

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
CONSTRUÇÃO CIVIL

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO AERANTE NAS PROPRIEDADES
DAS ARGAMASSAS FLUIDAS À BASE DE CIMENTO**

Dissertação submetida à Universidade Federal
de Santa Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil.

MAURO JOSÉ DE SOUZA ARAUJO

Florianópolis
2005

INFLUÊNCIA DO TEOR DE ADITIVO AERANTE NAS PROPRIEDADES
DAS ARGAMASSAS FLUIDAS Á BASE DE CIMENTO

MAURO JOSÉ DE SOUZA ARAUJO

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA
Especialidade ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo
programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Prof. Dr. Philippe Gleize (Orientador)

Prof. PH.D Henriette Lebre La Rovere (Coordenadora do Curso)

COMISSÃO EXAMINADORA

PH.D Humberto Ramos Romam

Dr. Ing. Janaide Cavalcante Rocha

Dr. Wellington Longuini Repette

Ficha Catalográfica:

ARAUJO, Mauro José de Souza

Influência do teor de aditivos aerantes nas propriedades das Argamassas Fluidas à base de cimento. Florianópolis, UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2003.

xx, 113 p.

Dissertação: Mestrado em Engenharia Civil (Construção Civil)

Orientador: Prof. Dr. Philippe Gleize

1. Argamassas 2. Argamassas fluidas 3. Argamassas de cimento 4. Aditivo aerante
5. Aditivo incorporador de ar

I. Universidade Federal de Santa Catarina

II. Título

*A mente que se abre a uma nova idéia
jamais voltará ao seu tamanho
original.*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter colocado em minha vida, pessoas tão maravilhosas.

À minha saudosa mãe, “in memoriam”, pelo eterno apoio à busca da ciência alicerçada na humildade do ser.

Ao meu pai Frederico, por suas orações que sempre estiveram presentes em minha vida em forma de saúde, determinação, alegria e boas amizades.

À minha querida esposa e companheira Claudia e aos meus filhos Marcelo, Marcio e Michelle Christine pelo carinho, compreensão e contínua colaboração na busca de novos caminhos.

Ao Prof. Dr. Philippe Gleize pela orientação na composição do desenvolvimento do trabalho.

À minha fiel e amiga engenheira Simone pela organização e auxílio nos trabalhos de revisão bibliográfica.

Às minhas estagiárias, Flávia e Keila, pela extrema dedicação e qualidade no auxílio da pesquisa e trabalho de digitação.

Aos colegas engenheiros José Wilson, Canova, Rubens e arquiteto Cássio que colaboraram no apoio científico através da demonstração de seus trabalhos acompanhados de uma forte dose de incentivo.

A todos os colaboradores da empresa Controlnort que estiveram realizando os ensaios de caracterização física dos materiais e as misturas dos traços.

Às empresas Lafarge e Chryso que enviaram os materiais para a confecção do estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, pela realização do mestrado.

À Universidade Estadual de Maringá, em conjunto com FADEC/UEM e FEESC/UFSC, que lutaram para a idealização deste mestrado.

SUMÁRIO

Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas	xvi
Lista de símbolos	xvii
Resumo	xix
Abstract.....	xx
 1 INTRODUÇÃO.....	 01
1.1 Objetivos da pesquisa	03
1.1.1 Objetivo geral.....	03
1.1.2 Objetivos específicos.....	03
1.2 Limitações da pesquisa.....	04
1.3 Estrutura da dissertação	05
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 06
2.1 Introdução.....	06
2.2 Materiais constitutivos	06
2.2.1 Cimento Portland.....	06
2.2.1.1 Generalidades.....	06
2.2.1.2 Tipos de cimento.....	07
2.2.1.3 Caracterização físico-mecânica.....	10
2.2.2 Agregado miúdo.....	12
2.2.2.1 Generalidades.....	12
2.2.2.2 Características da areias	12
2.2.2.3 Caracterização física	13
2.2.3 Água de amassamento	16
2.2.3.1 Generalidades.....	16
2.2.4 Aditivos	17
2.2.4.1 Histórico.....	17
2.2.4.2 Definições	18

2.2.4.3	Classificação	18
2.2.4.4	Ação dos aditivos	19
2.2.4.5	Aditivo incorporador de ar	20
2.2.4.6	Matérias-primas básicas dos incorporadores de ar	20
2.2.4.7	Fatores que influenciam a ação do incorporador de ar	21
2.2.4.8	Propriedades do aditivo incorporador de ar	22
2.2.4.9	Mecanismo de ação dos aditivos incorporadores de ar	23
2.2.4.10	Efeitos de superdosagem	25
2.3	Argamassas fluidas	26
2.3.1	Generalidades	26
2.3.2	Trabalhabilidade	29
2.3.3	Estudo da consistência	31
2.3.4	Coesão e tixotropia	31
2.3.5	Plasticidade	32
2.3.6	Porosidade	32
2.3.7	Permeabilidade	32
2.3.8	Resistência à compressão / resistência à tração	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	Caracterização dos materiais empregados	35
3.1.1	Cimento Portland	35
3.1.2	Agregado miúdo	36
3.1.3	Aditivo incorporador de ar	36
3.2	Metodologia de produção das argamassas	37
3.3	Ensaio no estado fresco	40
3.3.1	Avaliação da trabalhabilidade	40
3.3.2	Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado	41
3.4	Ensaio no estado endurecido	43
3.4.1	Resistência à compressão	43
3.4.2	Resistência à tração	45
3.5	Modelo estatístico de avaliação	46
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	50

4.1 Abatimento do tronco de cone.....	53
4.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado	60
4.3 Resistência à compressão	68
4.4 Resistência à tração	82
 5 CONCLUSÕES	 97
5.1 Conclusões.....	97
5.2 Recomendações para futuras pesquisas.....	100
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 101
 ANEXOS	 106
 ANEXO A – Caracterização dos materiais empregados no preparo das argamassas	 106
ANEXO B – Certificado de calibração do anel dinamométrico	110
ANEXO C – Gráficos de probabilidade	112

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Lançamento da argamassa fluida para preenchimento de vazio ocorrido abaixo da laje	01
FIGURA 2 – Vista geral de vala para alojamento de gasoduto	01
FIGURA 3 – Preenchimento de galeria de duto com argamassa fluida.....	02
FIGURA 4 – Vista parcial do preenchimento da galeria sendo executado.....	02
FIGURA 5 – Ação do aditivo incorporador de ar, com grupos polares hidrófilos e apolares acrófilos (BAUER,1985).....	24
FIGURA 6 – Ação do tensoativo sobre as bolhas de ar (BAUER, 1985).....	24
FIGURA 7 – Ação do tensoativo sobre as partículas de cimento ou de agregado muito fino (BAUER, 1985).....	25
FIGURA 8 – Realização do ajuste inicial da consistência da argamassa, através do ensaio de abatimento do tronco de cone.....	39
FIGURA 9 - Porcentagem de ar incorporado x tempo de mistura.....	40
FIGURA 10– Realização do ensaio de abatimento do tronco de cone após a adição do aditivo.....	41
FIGURA 11 – Ensaio de determinação da massa específica da argamassa através do método gravimétrico.....	42
FIGURA 12 – Ensaio de determinação da resistência à compressão.....	44
FIGURA 13– Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral. (a) Princípio do ensaio e (b) rompimento do corpo de prova.....	45

FIGURA 14 – Abatimento nas argamassas confeccionadas com cimento CPII – F – 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.	56
FIGURA 15 – Abatimento nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.	57
FIGURA 16 – Gráfico das médias do abatimento nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo.....	59
FIGURA 17 – Teor de ar incorporado nas argamassas confeccionadas com cimento CPII – F – 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.	64
FIGURA 18 – Teor de ar incorporado nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.	65
FIGURA 19 – Gráfico das médias do teor de ar incorporado nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo	67
FIGURA 20 – Resistência à compressão nas argamassas confeccionadas com cimento CPII – F – 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.....	72
FIGURA 21 – Resistência à compressão nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento	73
FIGURA 22 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo.....	75

FIGURA 23 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator teor de agregado.....	77
FIGURA 24 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator água-cimento.....	77
FIGURA 25 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos níveis do fator teor de aditivo nos cinco níveis do fator teor de agregado.....	79
FIGURA 26 – (a) Gráfico das médias da resistência à compressão para os diferentes níveis do teor de aditivo nos níveis do teor de agregado para o cimento CII – F (b) Gráfico das médias da resistência à compressão para os diferentes níveis do teor de aditivo nos níveis do teor de agregado para o cimento CPV – ARI – RS.....	81
FIGURA 27 – Resistência à tração por compressão diametral nas argamassas confeccionadas com cimento CII – F – 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento	86
FIGURA 28 – Resistência à tração por compressão diametral nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento	87
FIGURA 29 – Gráfico das médias da resistência à tração nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo	89
FIGURA 30 – Gráfico das médias da resistência à tração nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator teor de agregado	91
FIGURA 31 – Gráfico das médias da resistência à tração nos quatro níveis do fator teor de aditivo nos cinco níveis do fator teor de agregado	93
FIGURA 32 – (a) Gráfico das médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator teor de aditivo nos níveis do fator teor agregado para o cimento CII – F – 32 (b) Gráfico das médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator teor de aditivo nos níveis do fator teor de agregado para o cimento CPV – ARI – RS.....	95

FIGURA B1 – Certificado de calibração de anel dinamométrico	110
FIGURA B2 – Curva de aferição da prensa.....	111
FIGURA C1 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável abatimento	112
FIGURA C2 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável ar incorporado.....	112
FIGURA C3 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável resistência à compressão	113
FIGURA C4 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável resistência à tração por compressão diametral	113

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	Níveis dos fatores para o experimento 2x4x5	47
TABELA 2 –	Nomenclatura e proporção dos traços pesquisados para o cimento CII – F – 32	51
TABELA 3 –	Nomenclatura e proporção dos traços pesquisados para o cimento CPV – ARI – RS	52
TABELA 4 –	Resultados obtidos para argamassa no estado fresco, confeccionada com cimento CII – F – 32. Abatimento do tronco de cone	54
TABELA 5 –	Resultados obtidos para argamassa no estado fresco, confeccionada com cimento CPV – ARI – RS. Abatimento do tronco de cone	55
TABELA 6 –	Análise da variância para o abatimento	58
TABELA 7 –	Médias do abatimento nos diferentes níveis dos fatores	58
TABELA 8 –	Médias do abatimento nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo	59
TABELA 9 –	Resultados obtidos para as argamassas no estado fresco, confeccionadas com cimento CII – F – 32. Densidade teórica, aparente e teor de ar incorporado	62
TABELA 10 –	Resultados obtidos para as argamassas no estado fresco, confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS. Densidade teórica, aparente e teor de ar incorporado	63
TABELA 11 –	Análise da variância para o teor de ar incorporado	66

TABELA 12 – Médias do teor de ar incorporado nos diferentes níveis dos fatores.....	66
TABELA 13 – Médias do teor de ar incorporado nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.....	67
TABELA 14 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPII – F – 32. Resistência à compressão	70
TABELA 15 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS. Resistência à compressão .	71
TABELA 16 – Análise da variância para a resistência à compressão	74
TABELA 17 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis dos fatores	74
TABELA 18 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.....	75
TABELA 19 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado.	76
TABELA 20 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator teor de aditivo para os níveis fixados do fator teor de agregado	78
TABELA 21 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado e do fator teor de aditivo	80
TABELA 22 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPII – F – 32. Resistência à tração por compressão diametral	84

TABELA 23 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS. Resistência à tração por compressão diametral	85
TABELA 24 – Análise da variância para a resistência à tração por compressão diametral .	88
TABELA 25 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis dos fatores.....	88
TABELA 26 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.....	89
TABELA 27 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado	90
TABELA 28 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator teor de aditivo para os níveis fixados do fator teor de agregado	92
TABELA 29 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado e do fator teor de aditivo.....	94
TABELA A1 –Resultados dos ensaios de caracterização do cimento CII – F – 32	106
TABELA A2 –Resultados dos ensaios de caracterização do cimento CPV – ARI – RS.....	107
TABELA A3 –Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo	108
TABELA A4 –Resultados dos ensaios de caracterização do aditivo incorporador de ar	109

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

BSI – British Standards Institution

CNU – Coeficiente de não uniformidade

EB – Especificação Brasileira

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

SAS – Statistical Analysis System (programa estatístico utilizado no processamento dos dados)

SU – Sistema unificado

LISTA DE SÍMBOLOS

C_3A – Aluminato tricálcico

C_3S – Silicato tricálcico

$Ca(OH)_2$ – Hidróxido de cálcio

CO_2 – Anidrido carbônico

$CaCO_3$ – Carbonato de cálcio

CaO – Óxido de cálcio

CaO livre – Óxido de cálcio livre

Cl^- – Íon Cloreto

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

MgO – Óxido de magnésio

Fe_2O_3 – Óxido de ferro

Al_2O_3 – Óxido de alumínio

SiO_2 – Anidrido silício ou sílica

SO_3 – Anidrido sulfúrico

RI – Resíduo insolúvel

PF – Perda ao fogo

– Número da malha da peneira, equivalente a uma dada abertura, em mm

% – Porcentagem

m – metro

μm – 10^{-6} m, micrômetro

mm – 10^{-3} m, milímetro

cm – 10^{-2} m, centímetro

g – grama

Kg – quilograma

l – litro, unidade de volume

ml – mililitros, unidade de volume

cm^3 – centímetros cúbicos, unidade de volume

dm^3 – decímetro cúbico, unidade de volume

cm^2 – centímetros quadrados, unidade de área

cm^2/g – centímetros quadrados por grama, unidade de finura Blaine

g/cm^3 – grama por centímetro cúbico, unidade de densidade de massa

kg/m^3 – quilograma por metro cúbico, unidade de densidade de massa e consumo de cimento

kg/dm^3 – quilograma por decímetro cúbico, unidade de densidade de massa

rpm – rotações por minuto, unidade de velocidade de rotação

s – segundo, unidade de tempo

min – minuto, unidade de tempo

pH – potencial hidrogeniônico

MPa – 10^6 Pa, Mega Pascal

Kgf/cm^2 – quilograma força por centímetro quadrado, unidade de tensão

KN – 10^3 N, quilo Newton, unidade de força

σ^2 - variância

α - nível de significância, em porcentagem

$^{\circ}\text{C}$ – graus Celsius, unidade de temperatura

RESUMO

Atualmente, devido à velocidade do processo das construções, a necessidade por produtividade e qualidade nos serviços e a preocupação com o meio ambiente, novos materiais vêm sendo desenvolvidos com o intuito de se preencher espaços vazios, como os deixados pelas escavações de valas de fundação, túneis, tanques de combustíveis e dutos de uma maneira geral.

Um desses materiais que vêm sendo desenvolvidos consiste de argamassas fluidas, também conhecidas como CLSM – Controlled Low Strength Material ou Terrenos Cimentícios de Densidade Controlada.

São abordados nesta pesquisa, os efeitos provocados por diferentes dosagens de aditivo incorporador de ar em argamassas, confeccionadas com dois tipos de cimento em traços variados. Os quatro teores do aditivo que foram utilizados buscaram a definição de um teor ideal deste aditivo, proporcionando, assim, uma argamassa de boa qualidade.

As propriedades avaliadas foram a consistência e o teor de ar incorporado, na argamassa em estado fresco, e as resistências à compressão e à tração, na argamassa em estado endurecido.

Para caracterizar a influência do teor de aditivo, foram confeccionadas argamassas com relação agregado/aglomerante iguais a 6, 10, 14, 18, 22 e porcentagens de aditivo 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% em relação ao peso do cimento, empregando os cimentos CPII – F – 32 e CPV – ARI – RS.

Nos ensaios no estado fresco, as argamassas apresentaram significativa fluidez e incorporação de ar quando comparadas com argamassa sem aditivo. No entanto, o aumento do teor de aditivo não alterou de maneira significativa a quantidade de ar incorporado.

No estado endurecido, após a inclusão do aditivo as argamassas apresentaram um decréscimo significativo da resistência à compressão e da resistência à tração.

Para relações agregado/aglomerante superiores a 10, aumentos no teor de aditivo não exerceram influência nas propriedades analisadas das argamassas.

ABSTRACT

Nowadays, due to the speed of the process of buildings, the necessity of productivity and quality on the services and the concern about the environment, materials for the filling of empty spaces, such as the ones left by excavation of ditches, tunnels, tanks of fuel and pipes in general has been developed.

One of this materials consist of fluid mortars, also called CLSM – Controlled Low Strength Material or flowable fill.

This work presents the effect caused by different dosages of air entraining admixture in mortars made with two types of cements. The four air entraining admixture's ratio were used to define an ideal amount of this admixture that could result in a mortar with good qualities.

The evaluated properties were the entrained air content and consistency, in the fresh mortar, and the compressive and tensile strength, in the hardened mortar.

For this purpose, fifty different mortars were produced, using aggregate/binder ratio 6, 10, 14, 18, 22 and percentages of admixture 1,5%, 3,0%, 4,5% and 6,0% in relation to the weight of the cement.

The effect of the kind of cement on the behavior of mortars was also analyzed. Two types of cement were used, CII – F – 32 and CPV – ARI – RS.

Fresh mortars showed a significant flowability and air incorporation when compared with mortar without admixture. However, the increase of the admixture ratio did not modify in a considerable way the amount of entrained air significantly.

In the hardened state, after the admixture addition, the mortars presented a significant decrease of the compressive and tensile strength.

For aggregate/binder ratio higher than 10, an increase of admixture ratio didn't have no effect on mortars properties.

1. INTRODUÇÃO

Tem-se acompanhado nos últimos anos as intensas transformações na cadeia produtiva do país. A construção civil, não diferente dos demais setores, tem buscado novas alternativas tecnológicas a fim de aumentar sua produtividade e sua qualidade.

Muitas vezes, os construtores se deparam com situações que dificultam a produtividade dos seus serviços, tais como o preenchimento de vazios deixados pelas escavações de valas de fundação, túneis, tanques de combustível, dutos de uma maneira geral, redes telefônicas, ou ainda originados por situações acidentais, como erosões devidas a fortes vazamentos de água.

As figuras 1 a 4 ilustram alguns campos de aplicação da argamassa fluida.

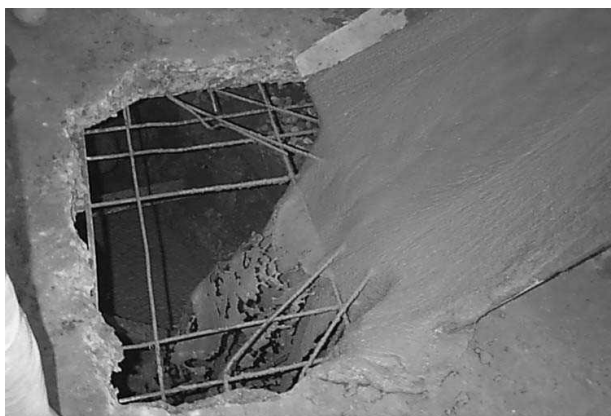


FIGURA 1 – Lançamento da argamassa fluida para preenchimento de vazio ocorrido abaixo da laje.



FIGURA 2 – Vista geral de vala para alojamento de gasoduto.



FIGURA 3 – Preenchimento de galeria de duto com argamassa fluida.



FIGURA 4 – Vista parcial do preenchimento da galeria sendo executado.

Desta forma, o emprego de argamassas fluidas tem se mostrado como uma nova tecnologia a ser adotada para trabalhos de preenchimento de vazios, em especial nas regiões de difícil acesso, permitindo situações mais práticas em relação às tradicionais, com ganhos significativos de qualidade, produtividade e desempenho. Somam-se a esses benefícios, menores incômodos no tocante ao fator limpeza, como por exemplo valas de redes públicas que precisam estocar os materiais e recolocá-los seguindo prescrições técnicas, tais como umidade e energia de compactação.

Nasce aí a necessidade de dominar o conhecimento desta nova tecnologia, que consiste na confecção de argamassas de cimento e areia, aditivadas com produtos químicos classificados como incorporadores de ar.

Trata-se de um produto que, colocado em pequenas quantidades na argamassa, torna-a fluida em um determinado tempo, oferecendo propriedades auto adensáveis, de forma a dispensar o uso de vibradores.

O estudo das suas propriedades permitirá aos engenheiros construtores optar pelo melhor traço, visando atingir as características do material a ser substituído, em função da sua solicitação.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito da adição de aditivo incorporador de ar nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas confeccionadas com cimento e areia, no estado fresco e endurecido, visando a sua utilização em preenchimento de vazios, em especial em regiões de difícil acesso.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o abatimento da argamassa após a inclusão de diferentes teores de aditivo;
- Determinar a porcentagem de ar incorporado das argamassas aeradas no estado fresco, para os diferentes teores de aditivo;
- Avaliar o comportamento mecânico das argamassas quanto à resistência à compressão, utilizando dois tipos de cimento diferentes, além de cinco teores de agregado e quatro teores de aditivo;
- Avaliar a resistência à tração das argamassas, pelo método da compressão diametral.

1.2 Limitações da pesquisa

Considerando que as argamassas em estudo destinam-se a serviços de terraplenagem e pavimentação, especialmente o preenchimento de vazios, e que para tais serviços não são exigidas resistências à compressão elevadas, adotou-se um intervalo de traço em peso, variando de 1:6 a 1:22 (cimento:agregado).

Em relação à quantidade de aditivo, as recomendações apresentadas no catálogo do fabricante indicam valores que giram em torno de 1,5% com relação ao peso de cimento. No entanto, é tema principal desse trabalho avaliar a influência dos incrementos percentuais do aditivo nas características físicas da argamassa. Desta forma, foram dosadas argamassas sem aditivo e com teores de aditivos iguais a 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% sobre o consumo de cimento.

Com o intuito de avaliar a influência do tipo de cimento no desempenho da argamassa, foram estudadas duas famílias distintas, denominadas “1” e “2”, com os cimentos CPII – F – 32 e CPV – ARI – RS, respectivamente. Ambas as famílias compreenderam uma matriz de 5 x 5 (teor de agregado x teor de aditivo), resultando em um total de 25 traços cada.

Foram confeccionados traços em peso, com quantidades de agregado variando de 6, 10, 14, 18 e 22 Kg, para 1 Kg de cimento, sendo que as cinco primeiras argamassas de cada traço, denominadas de “argamassa de referência” não foram incrementadas com aditivo. Para as demais foram realizadas dosagens com incrementos de aditivo em proporções de 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% sobre o consumo de cimento.

1.3 Estrutura da dissertação

Após uma breve introdução, na qual estão apresentados os objetivos da pesquisa, no Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, abordando as características dos materiais constitutivos da argamassa fluida, ou seja, o cimento Portland, o agregado miúdo e o aditivo. Trata-se também das principais propriedades da argamassa fluida, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia do estudo experimental, incluindo a caracterização dos materiais empregados, procedimentos adotados para a confecção das argamassas fluidas e as normas utilizadas para a realização dos ensaios de laboratório.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado fresco, ou seja, a consistência através do abatimento do tronco de cone, a densidade de massa e o teor de ar incorporado. Neste capítulo são também apresentados os resultados de resistência mecânica, isto é, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. A análise estatística dos resultados obtidos, avaliando a influência do teor de aditivo nas propriedades da argamassa tanto no estado fresco como no estado endurecido também é feita neste capítulo.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, incluindo as conclusões obtidas nessa pesquisa. Neste capítulo, também são feitas recomendações para outras pesquisas, considerando algumas limitações desse trabalho em virtude da diversidade de fatores influentes e da necessidade de limitá-los.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Uma vez que o presente trabalho contempla aspectos sobre o comportamento e propriedades de argamassas fluidas para utilização como enchimentos ou regularização e reforço de subleitos, é oportuno apresentar inicialmente, de maneira sucinta, algumas definições e características acerca das argamassas e de seus materiais constitutivos.

A argamassa é um dos materiais mais importantes da Engenharia Civil. É fruto da mistura íntima e proporcionada de uma pasta de aglomerante com agregado miúdo e, em alguns casos, aditivos, sendo que as propriedades da mesma dependem da qualidade e da quantidade de cada um destes componentes.

As argamassas têm largas aplicações, dentre elas cita-se a utilização em estruturas, revestimentos, pavimentos, paredes, canalizações, fundações, enchimentos, etc.

2.2 Materiais Constitutivos

2.2.1 Cimento Portland

2.2.1.1 Generalidades

Dentre os compostos da argamassa, o cimento Portland é o principal deles, promovendo a união entre os grãos do agregado, devido às suas propriedades aglomerantes (adesivas e coesivas). Ademais, controla resistência, permeabilidade e durabilidade da mistura. O cimento tem ainda uma grande influência na coloração da argamassa (BAUER, 1995).

Trata-se de um pó fino constituído por uma mistura de gesso e clínquer, este formado por silicatos e aluminatos de cálcio. É um aglomerante hidráulico. Depois de endurecido, mesmo que seja novamente submetido à ação da água, não se decompõe mais.

2.2.1.2 Tipos de Cimento

Há vários tipos de cimento utilizados correntemente no Brasil, com características físicas e químicas diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Entre os principais tipos, destacam-se:

Cimento Portland Comum (CP I e CP I-S) - NBR 5732

Utilizado quando não são requeridas as propriedades especiais especificadas para qualquer um dos outros tipos.

Cimento Portland Composto (CP II) – NBR 11578

Os cimentos compostos podem ser CP II-E (com escória), CP II-F (com filler) e CP II-Z (com pozolana).

O desenvolvimento dos cimentos Portland compostos e o crescimento de sua produção foram impulsionados em vários países da Europa e da Ásia como um resultado da economia potencial de energia.

Segundo AÏTCIN (2000), devido ao elevado custo do cimento, a substituição de uma parte deste material por subprodutos industriais (escória, cinza volante), materiais inertes (fillers calcários) e produtos naturais moídos (pozolanas naturais e argila calcinada) torna-se uma opção economicamente e ecologicamente atraente. Há que se dizer que tais materiais cimentícios suplementares possuem menor velocidade de hidratação. Reagem lentamente com os produtos de hidratação do cimento Portland e, nas primeiras horas após a mistura, praticamente não reagem. No caso de pozolanas tais como cinzas volantes, o tempo de reação pode durar semanas.

Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) - NBR 5735

É obtido pela moagem de escória granulada de alto-forno juntamente com o clínquer de cimento

Portland e a gipsita. A escória é um resíduo de fabricação de ferro gusa, obtido em quantidade aproximadamente igual àquela do ferro gusa produzido.

O cimento de alto-forno demanda um consumo de energia relativamente baixo no processo de sua fabricação.

NEVILLE (1982) cita que devido à, relativamente, alta resistência aos sulfatos, o cimento Portland de alto-forno é usado com frequência em obras marítimas.

Cimento Portland Pozolânico (CP IV) - NBR 5736

O cimento pozolânico é obtido pela moagem conjunta ou mistura de cimento Portland e pozolana. NEVILLE (1982) define as pozolanas como materiais naturais ou artificiais que contêm sílica em forma reativa. A ASTM C 618-78 descreve as pozolanas como materiais silicosos ou silico-aluminosos que têm pouca ou nenhuma capacidade cimentante intrínseca, mas que, finamente pulverizadas e, na presença de umidade, formam produtos com capacidade cimentante. Dentre os materiais pozolânicos mais comuns cita-se a cinza vulcânica, a pumicita, as calcedônias, as opalas, as terras diatomáceas calcinadas, as argilas calcinadas, as cinzas volantes, etc.

Ainda segundo NEVILLE (1982), não é possível fazer uma afirmativa geral sobre os cimentos Portland pozolânicos porque a velocidade de endurecimento depende da atividade da pozolana e da proporção de cimento Portland. No entanto, em geral, os cimentos Portland pozolânicos mostram um aumento de resistência muito lento e exigem, portanto, cura durante um período relativamente mais longo, mas a resistência final é, aproximadamente, igual a do cimento Portland comum sem adição. Devido à hidratação lenta, apresentam baixa velocidade de desprendimento de calor.

Os cimentos pozolânicos apresentam ainda boa resistência aos sulfatos e outros agentes agressivos, e possibilitam ainda a redução da permeabilidade da argamassa.

Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) - NBR 5733

Permite obter resistência elevada, em curto período de tempo, geralmente uma semana ou menos. É um cimento que possui uma maior finura Blaine em relação aos cimentos comuns.

Cimento Portland Resistente aos Sulfatos (RS) - NBR 5737

Trata-se de um tipo de cimento capaz de combater o ataque por sulfatos, vindos do exterior do concreto ou da argamassa. Segundo NEVILLE (1982), os sais mais particularmente ativos são os sulfatos de sódio e de magnésio. O cimento Portland resistente a sulfatos possui baixo teor de C_3A e alto teor de silicatos.

CÁNOVAS (1988) cita que os cimentos com adições inertes, como por exemplo o carbonato de cálcio, moídos na mesma finura, caracterizam-se por ter um endurecimento mais lento que os cimentos puros, devendo ser considerada essa circunstância na hora de dosar a mistura, pela repercussão que possa ter, tanto na quantidade de cimento a ser empregado, quanto na quantidade de água a ser utilizada.

Acrescentando-se mais cimento para que a quantidade de aglomerante hidráulico corresponda à nominal, estarão sendo introduzidos finos com suas inevitáveis conseqüências (em especial a diminuição da resistência pelo adicional de água exigido a fim de manter a mesma trabalhabilidade).

Empregando-se uma relação água/cimento fixa, como o cimento contém adições, a relação efetiva água/aglomerante será maior, com a conseqüente repercussão nas resistências mecânicas.

Parte da quantidade da água de amassamento que excede à de hidratação, não é consumida na formação de compostos secundários, como acontece quando as adições são hidraulicamente ativas, mas fica livre, originando misturas pouco compactas e porosas com os conseqüentes efeitos nocivos sobre sua durabilidade.

Nesta pesquisa, considerando-se os aspectos fluidificantes do aditivo utilizado, podemos dizer que, segundo AÏTCIN (2000), não existe uma teoria clara e aceita para explicar em todos os pormenores a ação desses aditivos sobre as partículas do cimento durante a mistura do concreto e hidratação do cimento Portland. Dessa forma, não é possível a definição de um tipo de cimento ideal para a utilização nas argamassas fluídas que serão empregadas nas obras de preenchimento de vazios.

2.2.1.3 Caracterização Físico-mecânica

Os principais ensaios físico-mecânicos de caracterização do cimento são: resistência à compressão, tempos de início e fim de pega e finura.

- Resistência à Compressão

NEVILLE (1982) cita que a resistência mecânica do cimento endurecido é a propriedade do material talvez mais necessária para uso estrutural. A resistência da argamassa depende da coesão da pasta de cimento, de sua aderência às partículas do agregado, e até certo ponto, da resistência do próprio agregado.

Levando-se em consideração que a reatividade com a água dos compostos individuais do cimento Portland varia consideravelmente, MEHTA e MONTEIRO (1994) afirmam que é possível modificar as características de desenvolvimento da resistência dos cimentos simplesmente alterando as proporções destes compostos.

A resistência mecânica é determinada através da moldagem de corpos de prova cilíndricos de uma argamassa de cimento e areia normalizada, com proporções determinadas e preparada com materiais especificados. Os corpos de prova são ensaiados a várias idades, por compressão axial simples.

NEVILLE (1982) expõe que a relação entre as resistências à compressão do cimento e da argamassa é linear.

- Tempos de Pega

NEVILLE (1982) refere-se à pega como sendo uma mudança de estado fluido para estado rígido, provocada pela hidratação seletiva dos compostos de cimento, em especial o C_3A e o C_3S .

MEHTA e MONTEIRO (1994) definem que o termo “pega” implica na solidificação da pasta plástica de cimento. Ainda segundo os autores, o começo da solidificação, chamado “início de pega”, marca o ponto no tempo em que a pasta se torna não trabalhável. No entanto, a pasta não se solidifica repentinamente; necessita de um tempo considerável para

tornar-se totalmente rígida. O tempo necessário para solidificar completamente marca o tempo de “fim de pega”. Os tempos de início e fim de pega são quase universalmente determinados pelo aparelho de Vicat.

NEVILLE (1982) ressalta ainda que é conveniente distinguir pega de endurecimento, termo este que designa o aumento de resistência de uma pasta de cimento depois da pega. O endurecimento pode ser explicado pelo preenchimento dos poros capilares pelos produtos de hidratação do cimento. A principal fonte de resistência nos produtos sólidos da pasta é a existência de forças de atração de Van der Waals (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A adesão entre duas superfícies sólidas pode ser atribuída a estas forças de natureza física, sendo o grau de ação aderente dependente da extensão e natureza das superfícies envolvidas. Os pequenos cristais de C-S-H, de sulfoaluminatos de cálcio hidratados e de aluminatos de cálcio hidratados hexagonais possuem área específica e capacidade de adesão elevadas. Estes produtos de hidratação do cimento Portland tendem a aderir fortemente, não somente uns aos outros, mas também a sólidos de área específica baixa, tais como o hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro, e partículas de agregado miúdo e graúdo.

O processo de pega é acompanhado por mudanças de temperatura na pasta de cimento; o início da pega corresponde a uma rápida elevação da temperatura, e o fim da pega ao pico da temperatura (NEVILLE, 1982).

Ainda segundo o autor, além da rapidez de formação de produtos cristalinos, a formação de películas em torno dos grãos de cimento e o desenvolvimento de uma coagulação mútua dos componentes da pasta também foram sugeridos como fatores de evolução da pega.

- Finura

Segundo NEVILLE (1982), a finura é uma propriedade fundamental do cimento e tem que ser controlada com cuidado.

A finura do cimento influencia a sua reação com a água. Geralmente quanto mais fino o cimento, mais rápido ele reagirá. Para uma dada composição, a taxa de reatividade e, portanto, de desenvolvimento da resistência, pode ser aumentada através de uma moagem mais fina do cimento; porém, o custo da moagem e o calor liberado na hidratação

estabelecem alguns limites para a finura. Também há que se acrescentar que quanto mais fino o cimento, mais rapidamente se deteriora por exposição ao ar (NEVILLE, 1982). Ainda segundo NEVILLE (1982), cimentos mais finos acarretam retrações mais elevadas e grande tendência à fissuração. No entanto, um cimento mais fino apresenta menor exsudação.

Salienta-se ainda que um aumento da finura do cimento aumenta ligeiramente a trabalhabilidade da mistura quando mantida a consistência padrão (NEVILLE, 1982).

2.2.2 Agregado Miúdo

2.2.2.1 Generalidades

Por ocuparem o maior volume da mistura, o conhecimento das características do agregado miúdo empregado bem como do papel desempenhado pelo mesmo na argamassa é de grande importância.

O agregado miúdo é distribuído na pasta de cimento principalmente por razões de economia, uma vez que apresenta custo inferior ao custo do cimento. Além deste fator, as areias conferem ainda características técnicas vantajosas em relação à pasta de cimento pura, entre as quais aumento da trabalhabilidade (pelo formato dos grãos) e aumento da estabilidade dimensional, resistência e durabilidade (por se tratar de uma mistura mais densa).

BAUER (1995) cita que a retração da argamassa se deve à pasta de cimento, então quanto maior o consumo de agregados menor será a retração e, conseqüentemente, menor a probabilidade de fissuração e maior a durabilidade do material aplicado.

2.2.2.2 Características das Areias

O formato e a textura dos grãos de areia tem muita importância no seu comportamento mecânico, pois determinam como eles se encaixam e se entrosam, e, em contrapartida, como eles

deslizam entre si, quando solicitados por forças externas. Chama-se de “mobilidade” a facilidade com que as partículas se movem umas sobre as outras quando manipuladas (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986).

A forma arredondada das areias naturais permite a obtenção de argamassas mais econômicas, uma vez que requerem menos pasta de cimento para produzirem misturas trabalháveis, por possuírem menor área específica.

Assim, quanto mais arredondadas as partículas, melhor a trabalhabilidade da mistura fresca exigindo menos água de amassamento, e portanto, permitindo a obtenção de resistências mais elevadas (BAUER, 1995).

Agregados bem graduados, ou seja, com existência de grãos de diversos diâmetros, possibilitam o emprego de maior quantidade desse material em um determinado volume de argamassa, conferindo um melhor comportamento à mesma. Isto porque as partículas menores ocupam os vazios correspondentes às maiores, criando um entrosamento, do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência (PINTO, 1986). De acordo com o mesmo autor, a indicação de tal característica é dada pelo “coeficiente de não uniformidade” ($CNU = D_{60}/D_{10}$). O CNU expressa a amplitude do tamanho dos grãos. Quanto maior o coeficiente de não uniformidade, mais bem graduada é a areia.

2.2.2.3 Caracterização Física

O conhecimento das características dos agregados miúdos determinadas através da realização dos ensaios de composição granulométrica, teor de umidade, inchamento, massa específica e massa unitária são uma exigência para a dosagem das argamassas.

Ademais, a realização de ensaios de caracterização do tipo determinação do teor de materiais pulverulentos, teor de argila e partículas friáveis e impurezas orgânicas são importantes para a obtenção de índices de qualidade do agregado empregado na produção das argamassas.

- Composição Granulométrica

A granulometria de cada agregado deve ser conhecida e controlada, pois exerce uma influência muito importante sobre a qualidade das argamassas, especialmente sobre a compacidade, a resistência aos esforços mecânicos e a aparência.

MEHTA e MONTEIRO (1994) citam que há várias razões para a especificação de limites granulométricos e da dimensão máxima dos agregados, sendo a mais importante a sua influência na trabalhabilidade e custo. Por exemplo, areias muito grossas produzem misturas ásperas e não trabalháveis, e areias muito finas aumentam o consumo de água (portanto, o consumo de cimento para uma dada relação água/cimento) e são antieconômicas; agregados que não têm uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, em especial, produzem as misturas mais trabalháveis e econômicas.

Conforme citado por BAUER (1995), a granulometria uniforme, geralmente, apresenta um volume de vazios maior, exigindo maiores quantidades de pasta e argamassa. A granulometria contínua corresponde à granulometria ótima, a qual para uma mesma consistência e mesma relação água/cimento, fornece um consumo mínimo de cimento.

- Teor de Umidade / Inchamento

O teor de umidade deve ser considerado na determinação das quantidades de componentes para preparo da argamassa, diminuindo-se da água a ser adicionada a quantidade de umidade do agregado (NEVILLE, 1982).

A respeito do inchamento, trata-se de um fenômeno que gera um aumento considerável do volume aparente da areia, uma vez que a tensão superficial da água mantém as partículas afastadas.

- Massa Específica / Massa Unitária

A massa unitária é utilizada para converter quantidades expressas em massa em quantidades expressas em volume e vice-versa, bem como para cálculo do consumo do material empregado por metro cúbico de argamassa.

SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986) citam que a massa unitária varia na razão inversa dos vazios de um determinado volume de materiais. Os vazios são afetados pela forma, distribuição de tamanhos e arranjo ou compactação das partículas. Assim, agregados arredondados têm vazios menores entre as partículas que os agregados angulosos; agregados graduados em diversos tamanhos têm menos vazios que aqueles de tamanho único de partículas; agregados compactados têm melhor arranjo entre as partículas e, conseqüentemente um menor volume de vazios.

- Substâncias Nocivas

O conhecimento da quantidade de substâncias deletérias presentes nos agregados é de fundamental importância para evitar prejuízos à resistência, trabalhabilidade, pega, endurecimento e características de durabilidade e estética da argamassa.

- Materiais Pulverulentos

A presença de materiais pulverulentos acima dos limites estabelecidos em norma afeta a trabalhabilidade da argamassa e aumenta o consumo de água. Segundo CÁNOVAS (1988), o excesso de finos é prejudicial à mistura.

Ainda segundo CÁNOVAS (1988), aumentando a quantidade de água de que necessitam as misturas com finos, são originados efeitos patológicos devido à maior retração e maior porosidade, o que pode acelerar a sua destruição, caso o ambiente seja agressivo.

- Teor de Argila e Partículas Friáveis

A avaliação do teor de argila e partículas friáveis no agregado auxilia na verificação da durabilidade do mesmo, visto que indica a relativa resistência do agregado a produzir finos argilosos, quando submetido a um processo de degradação (SCANDIUZZI e ANDRIOLO, 1986).

Torrões de argila e partículas friáveis, da mesma forma como os materiais pulverulentos, afetam a trabalhabilidade da mistura. Ademais, prejudicam a aderência entre o agregado e a pasta de cimento.

Segundo NEVILLE (1982), partículas quimicamente estáveis não têm nenhum efeito nocivo; no entanto os fenômenos de retração podem ser intensificados. Já as partículas quimicamente ativas podem causar sérios problemas.

- Impurezas Orgânicas

A presença de matéria orgânica na areia da argamassa interfere nas reações químicas de hidratação do cimento (NEVILLE, 1982). Geralmente são produtos da decomposição de vegetais, principalmente ácido tânico e derivados. Aparecem sob a forma de húmus e argila orgânica. BAUER (1985), cita que a cor escura da areia é indício de matéria-orgânica.

2.2.3 Água de Amassamento

2.2.3.1 Generalidades

A água de amassamento possui duas funções essenciais: a de conferir mobilidade às argamassas, possibilitando que a mistura seja trabalhável e a de combinar-se quimicamente com o aglomerante quando das reações de hidratação, proporcionando endurecimento e resistência à argamassa.

Ao ser misturada com o aglomerante, a água possibilita a formação de uma pasta que endurece por reações químicas imediatas, para gerar compostos que podem ter elevada resistência mecânica a médio e longo prazo e resistência à ação da água (SELMO, 1989).

A hidratação começa tão logo o cimento Portland entra em contato com a água, porque, de um lado, alguns dos componentes do cimento são muito reativos e, de outro, porque o cimento contém partículas muito finas e, dessa forma, uma grande superfície das fases reativas está em contato com a água (AÏTCIN, 2000). A pasta de cimento basicamente produz um gel cimentício resistente (C-S-H) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que com o tempo sofre reação com o CO_2 do ar e se transforma em CaCO_3 (carbonatação).

A água a ser utilizada na produção das argamassas deve ser livre de impurezas que afetam a reação com o cimento. O efeito das impurezas na água depende da natureza e do teor das substâncias encontradas, tais como sais, óleos, ácidos e matéria orgânica, podendo vir a comprometer a estabilidade e resistência da mistura.

SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986) comentam que a melhor maneira de medir a qualidade da água é por meio de ensaios comparativos de resistência da argamassa, na idade de 28 dias.

No entanto, os maiores problemas no tocante à água são relacionados com o emprego da mesma em excesso. Excessos de água provocam diminuição da resistência mecânica. Segundo BAUER (1995), uma grande variabilidade no teor de água gera grandes dispersões na resistência e na coloração do concreto.

2.2.4 Aditivos

2.2.4.1 Histórico

COLLEPARDI et al. (1983) comentam que o emprego de aditivos na construção civil data de alguns milênios. Sabe-se que os romanos e egípcios empregavam albumina, alcatrões e até sangue – de efeitos plastificante e incorporador de ar – para melhoria das características dos conglomerados da época.

Este mesmo autor ainda diz que a partir da fabricação do cimento Portland, iniciada na segunda metade do século XIX, várias substâncias foram sendo utilizadas como aditivo de pastas, argamassas e concretos de cimento Portland.

Uma dessas substâncias foi, e ainda é o gesso. Este é adicionado ao clínquer, no sentido de regular o seu tempo de pega.

Cerca de dez anos após a descoberta do cimento Portland, descobriu-se também o efeito dos cloretos como aceleradores do endurecimento da pasta. (COLLEPARDI, 1983)

Já na década de 30 foi, por acaso, descoberto nos Estados Unidos, o efeito dos aditivos incorporadores de ar, que agem no concreto através minúsculas bolhas elásticas. De lá para cá, muitos outros aditivos têm sido descobertos e empregados.

2.2.4.2 Definições

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 13529) 1995 designou o termo aditivo como “produto adicionado à argamassa ou concreto em pequena quantidade, com a finalidade de melhorar uma ou mais propriedades, no estado fresco ou endurecido”.

A AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM C 125) 1992 definiu aditivo como “material outro que não água, agregado ou cimento, empregado como ingrediente do concreto ou da argamassa, adicionado a estes antes ou durante a mistura”.

BAUER (1985) define como aditivo “todo produto não indispensável à composição e à finalidade do concreto, que, colocado na betoneira imediatamente antes ou durante a mistura do concreto, em quantidades geralmente pequenas e bem homogeneizado, faz aparecer ou reforça certas características”.

2.2.4.3 Classificação

A classificação dos aditivos é baseada nos efeitos de seu emprego. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT NBR 11768 – EB 1763/92) classifica como:

- Aditivo plastificante (Tipo P): produto que aumenta o índice de consistência do concreto ou argamassa, mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir concreto com determinada consistência.

- Aditivo retardador (Tipo R): produto que aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto ou argamassa.
- Aditivo acelerador (Tipo A): produto que diminui os tempos de início e fim de pega do concreto ou argamassa, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais.
- Aditivo plastificante-retardador (Tipo PR): produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e retardador.
- Aditivo plastificante-acelerador (Tipo PA): produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e acelerador.
- Aditivo incorporador de ar (Tipo IAR): produto que incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto ou argamassa.
- Aditivo superplastificante (Tipo SP): produto que aumenta sensivelmente o índice de consistência do concreto ou argamassa, mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir concreto ou argamassa com determinada consistência.
- Aditivo superplastificante-retardador (Tipo SPR): produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e retardador.
- Aditivo superplastificante-acelerador (Tipo SPA): produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador.

2.2.4.4 Ação dos Aditivos

COLLEPARDI (1980) cita que, no que diz respeito à classificação dos aditivos, resta assinalar uma distinção entre a ação química e física que os aditivos desenvolveriam no concreto ou na argamassa.

O mesmo autor cita ainda que os aditivos aceleradores e retardadores, que, respectivamente aceleram e retardam a reação entre a água e o cimento, poderiam ser incluídos entre os que desenvolvem uma ação predominantemente química. Os aditivos incorporadores de ar, impermeabilizantes, plastificantes e superfluidificantes, ao contrário, agem através de um mecanismo predominantemente físico, com alguma função secundária eventual de natureza química para os dois últimos, os plastificantes e os superfluidificantes.

2.2.4.5 Aditivo Incorporador de Ar

Segundo COLLEPARDI (1980), no passado, os aditivos incorporadores de ar eram adicionados ao cimento, e mais freqüentemente ao concreto, principalmente para melhorar a resistência aos ciclos de gelo e degelo, pela formação de microbolhas de ar homogeneamente dispersas no material. A dimensão, o espaçamento e o número de microbolhas eram e continuam sendo parâmetros essenciais que governavam a resistência do concreto ao gelo.

O principal aditivo empregado em argamassas é o incorporador de ar, cujo mecanismo principal de ação é a incorporação e estabilização de uma quantidade elevada de microbolhas, homogeneamente distribuídas no conglomerado fresco, mantendo-as incorporadas após a pega e o endurecimento.

Segundo YAZIGI (1999), o aditivo incorporador de ar possui moléculas polares semelhantes aos plastificantes, que se localizam na interface ar-água, formando pequenas bolhas de ar que se repelem e se mantêm no meio líquido. O efeito do aditivo nas misturas é, então, uma grande quantidade de pequenas bolhas de ar que, no concreto ou na argamassa em estado fresco, melhora a trabalhabilidade, pois funciona como se fossem partículas arredondadas de um agregado muito fino.

2.2.4.6 Matérias-Primas Básicas dos Incorporadores de Ar

De acordo com COLLEPARDI (1980), existem vários produtos químicos que podem ser empregados como matérias primas básicas na produção de incorporadores, entre os quais encontram-se os do tipo aniônico: ácido abiético, sais de ácidos graxos (ácido oléico ou cáprico), alquil-arissulfonatos e alquilsulfonatos; os do tipo catiônico: sais de alquil amônio e os do tipo não-iônico: alquilfenóis etoxilados.

2.2.4.7 Fatores que Influenciam a Ação do Incorporador de Ar

Segundo NEVILLE (1982), deve-se levar em conta o fato de que para um mesmo aditivo incorporador adicionado, o volume de ar que se desenvolve depende do tipo de inerte empregado; um excesso do material finíssimo da areia diminui o ar incorporado, enquanto a fração entre 300 e 600 μm aumenta este teor. Assim, areias médias e grossas incorporam mais ar do que as areias finas. O teor de ar também aumenta quando se usa agregados arredondados em lugar de angulosos e quando se emprega areias de distribuição granulométrica com mais vazios.

BAUER (1985) especifica que o teor de cimento nas argamassas exerce influência na incorporação de ar, sendo que quanto menor o percentual de cimento maior é a incorporação. Acima de 300 kg/m^3 a incorporação de ar é restrita, por não haver espaço livre para a geração das bolhas.

O tipo de cimento também influencia a incorporação de ar para uma mesma dosagem de aditivo, pois cimentos mais finos levam geralmente a um volume menor de ar incorporado, assim como um teor mais elevado de álcalis no cimento, principalmente acima de 0,8%, aumenta o teor de ar obtido. O teor de aditivo, no caso de cimentos com cinzas volantes, deve ser maior com o aumento do teor de carvão devido à maior quantidade de material fino inerte; um aumento deste de 1% para 12%, exige a triplicação do teor de aditivo.

O mesmo autor cita ainda que o tempo de mistura, de transporte, e de adensamento influenciam o volume de ar efetivamente incorporado. Se o tempo de mistura for muito curto, o incorporador não chega a ficar suficientemente espalhado, mas, um prolongamento da mistura de concreto leva a uma diminuição do ar incorporado, tanto maior quanto mais elevada é a temperatura. O transporte reduz o teor de ar incorporado, assim como a vibração, que expulsa parte do ar.

Ainda segundo BAUER (1985), para obter o mesmo teor de ar incorporado precisaremos de maior quantidade de aditivo quando o cimento contiver menos sulfatos e álcalis solúveis e for também mais fino.

SCANDIUZZI e ANDRIOLO (1986) também expõem que cimentos com elevados teores de álcalis exigem menores quantidades de aditivos enquanto que cimentos pozolânicos ou de alta

resistência inicial exigem maiores quantidades de aditivos para alcançar os mesmos resultados. Os autores comentam ainda que adições de materiais pozzolânicos normalmente reduzem a incorporação de ar dos concretos.

NEVILLE (1982) afirma também que a água de amassamento, quando classificada como dura (água geralmente alcalina, devido à presença de cálcio e magnésio e que necessita de grande quantidade de sabão para produzir espuma), exige teores maiores de incorporador de ar. Já que a água usada para lavagem de caminhões-betoneira é dura, não pode ser usada para preparo de concreto ou argamassa com ar incorporado.

Salienta-se ainda que a proporção de água na mistura influencia no teor de ar incorporado, sendo que quanto mais seca for a argamassa, menor é o ar introduzido.

2.2.4.8 Propriedades do Aditivo Incorporador de Ar

Segundo COLLEPARDI (1980), o efeito positivo do incorporador sobre a trabalhabilidade do concreto é geralmente atribuído à formação de microbolhas esféricas e deformáveis que facilitam o manuseio do concreto. Se, em particular, a introdução das microbolhas é acompanhada de uma redução de um volume equivalente de areia, a superfície específica menor do inerte leva a uma exigência de água menor para uma mesma trabalhabilidade de mistura, ou a uma trabalhabilidade maior para uma mesma relação água cimento (a/c).

Um outro aspecto importante dos aditivos incorporadores diz respeito à estabilidade das microbolhas, isto é, a resistência a serem expulsas da pasta, por exemplo, como resultado da vibração. É possível aumentar a estabilidade do sistema de microbolhas se estas são adsorvidas pelas partículas sólidas; a adsorção provoca também uma redução na separação das partículas sólidas da água, e portanto uma diminuição sensível na exsudação. É possível que a maior coesão e homogeneidade da pasta, associada à falta de continuidade entre uma microbolha e outra, seja responsável pela permeabilidade sensivelmente menor do concreto com aditivo incorporador.

2.2.4.9 Mecanismo de Ação dos Aditivos Incorporadores de Ar

- Ação do Aditivo sobre as Bolhas de Ar

Segundo BAUER (1985), a argamassa possui uma grande quantidade de ar, que é introduzida durante o período de mistura. O ar mistura-se à água e as bolhas assim formadas, por serem instáveis, agrupam-se formando outras de maiores dimensões, de até 10 mm de diâmetro, que escapam durante o lançamento.

O ar que é incorporado por força do aditivo tem características diferentes do introduzido na argamassa quando do seu preparo. De acordo com BAUER (1985), formam-se pequenas bolhas de dimensões entre 10 e 1000 micra, sendo que a maior parte encontra-se compreendida entre 25 e 250 micra. As distâncias entre as bolhas variam de 100 a 200 micra. As bolhas têm diâmetros diferentes, constituindo uma certa granulometria, e são deformáveis.

BAUER (1985) afirma que o incorporador de ar é um tensoativo que age diminuindo a tensão superficial da água.

O mesmo autor comenta que os aditivos pertencem ao grupo dos “difilos”, possuindo uma extremidade hidrófila, que atrai a água e uma hidrófoba, que repele a água (Figura 5).

Devido à sua menor densidade, a bolha tenderá a subir. Ao chegar junto à superfície, estabilizará sem se romper (Figura 6).

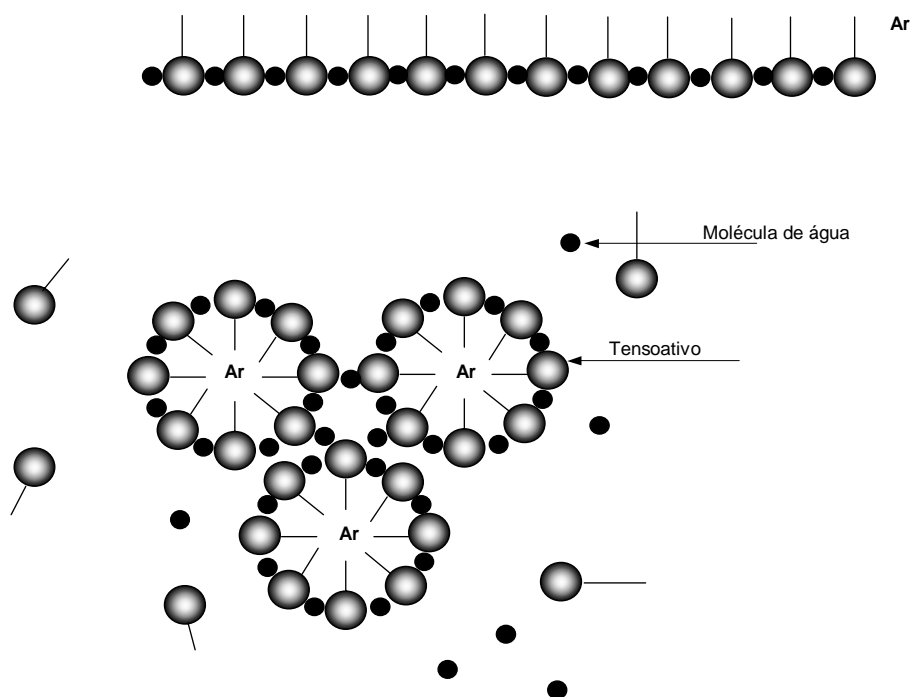


FIGURA 5 – Ação do aditivo incorporador de ar, com grupos polares hidrófilos e apolares acrófilos (BAUER, 1985).

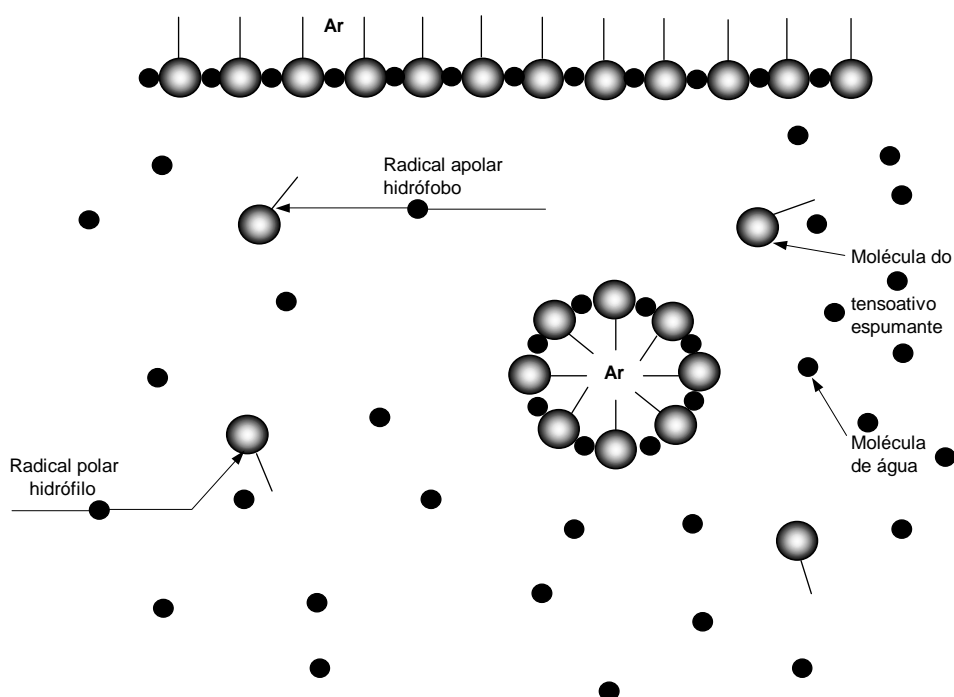


FIGURA 6 – Ação do tensoativo sobre as bolhas de ar (BAUER, 1985).

- Ação do Aditivo sobre as Partículas de Cimento

De acordo com BAUER (1985), a ação do aditivo sobre as partículas de cimento ou de agregado muito fino, se dá através de uma camada monomolecular com seu radical polar (acróforo) ou camadas multimoleculares de ordem par. Esse posicionamento das moléculas acarreta a flotação ou agrupamento das partículas pela solubilidade dos restos apolares. A Figura 7 ilustra o modo de ação do tensoativo sobre as partículas sólidas, bem como sobre as partículas sólidas e bolhas concomitantemente.

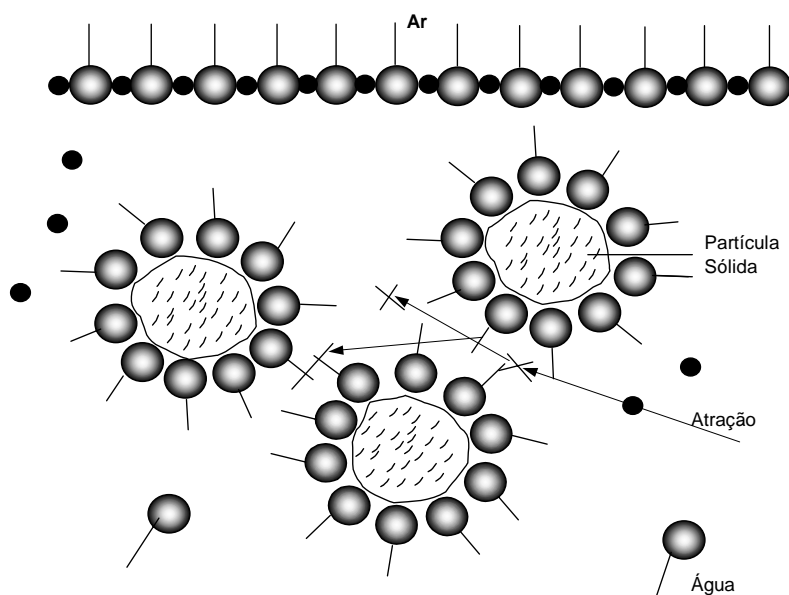


FIGURA 7 – Ação do tensoativo sobre as partículas de cimento ou de agregado muito fino (BAUER, 1985).

Por outro lado, o aditivo unido por sua extremidade polar às partículas fixa sobre a sua superfície bolhas estabilizadas por meio de seus radicais apolares hidrófobos. Desse modo, uma partícula recoberta por um certo aditivo, entrando em contato com uma bolha recoberta pelo mesmo aditivo ou por outro de igual natureza, forma um grupo mais estável.

2.2.4.10 Efeitos de Superdosagem

Conforme o Manual Aditivos para concretos, argamassas e caldas de cimento (OTTO BAUMGART, 1986), adições excessivas do aditivo não incorporam maior volume de ar do que sua característica química permite, mas tornam o cimento hidrófobo, podendo levá-lo à floculação.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), um excesso de aditivo pode causar um retardamento excessivo na hidratação do cimento. Os autores mencionam também que grandes quantidades de ar incorporado são acompanhadas de uma perda de resistência.

YAZIGI (1999) afirma que o uso de incorporador de ar resulta em redução da resistência devido aos vazios introduzidos. No entanto, a diminuição do teor de água pode redundar em aumento de resistência maior do que a perda devida ao ar incorporado.

2.3 Argamassas Fluidas

2.3.1 Generalidades

A argamassa fluida, também conhecida como CLSM – *Controlled low strength material* ou *flowable fill*, que é objeto de estudo nesta pesquisa é, segundo DU (2002), um material fluido, de baixa resistência mecânica e que possui grande capacidade de compactação própria, não necessitando de vibração.

BUTALIA (2000), complementa o texto acima quando diz que as argamassas fluidas possuem capacidade de compactação própria, sofrendo endurecimento rápido – de apenas algumas horas – e com possibilidade de serem escavadas no futuro, se necessário.

O principal uso dessas argamassas é o preenchimento de espaços vazios, em especial os de difícil acesso. Como situações específicas, podemos citar:

- Enchimentos fluidos e leves, como lajes, valas de fundação, túneis, tanques de combustível, galerias de dutos de uma maneira geral, redes telefônicas, muros de contenção, etc;
- Preenchimento de erosões do solo;
- Preenchimento de vazios sob pavimentos e lajes;
- Regularização de sub-bases de fundações, bases de lajes de pisos e dormentes de tubulações;
- Reforço de subleito.

KATZ (2003) reforça as afirmações acima, dizendo que as argamassas fluidas são usadas, principalmente, para o preenchimento de cavidades em obras de engenharia civil, onde a aplicação de outros materiais, geralmente granulares, é difícil, ou até impossível.

As vantagens advindas de utilização das argamassas fluidas são, além da menor energia de trabalho requerida dos trabalhadores, uma maior velocidade na construção e maior produtividade no canteiro de obras. (DU, 2002)

O custo do material, embora próximo do custo de um concreto convencional, é menor do que este pois não há necessidade de vibração, economizando-se, então em equipamento e mão-de-obra. (FISHMAN, 2005)

O fato de que o lançamento dessas argamassas em valas e dutos pode ser feita diretamente do caminhão-betoneira – diminuindo a quantidade de pessoal necessário para realização dos serviços – também se caracteriza em uma vantagem importante. Esse fato – aliado à não necessidade de vibração – além de conferir agilidade ao processo também favorece a segurança do trabalhador, pois esse não precisa entrar dentro das valas para o lançamento do material, evitando, assim, acidentes de trabalho. (FISHMAN, 2005)

FISHMAN (2005) ainda cita que uma economia de material também é verificada no fato de que o caminhão-betoneira possui capacidade de entregar a quantidade exata de argamassa necessária para determinado uso, evitando desperdícios.

Um uso de grande importância para a pavimentação – quando utilizada para reforço de subleito, está no fato de que o tempo de interrupção de tráfego necessário para obras em que se usará a argamassa fluida é bastante pequeno, pois o endurecimento do material é rápido. (FISHMAN, 2005)

Além das vantagens citadas acima, podemos incluir na lista de benefícios os aspectos ambientais provenientes das argamassas fluidas. Como é possível a utilização de subprodutos industriais em sua composição – como a cinza volante, pó asfáltico, entre outros – tem-se uma redução no

impacto ambiental causado pela geração de resíduos sólidos industriais, favorecendo, assim, o meio ambiente. (MISSISSIPPI CONCRETE INDUSTRIES ASSOCIATION, 2005)

As argamassas fluidas de baixa densidade, as quais são discutidas nesse estudo, pelo seu comportamento e suas propriedades, se confundem em algumas literaturas com os chamados “concretos leves” de moderada resistência, os quais também são denominados “concretos para enchimento”.

Já para o caso de argamassas fluidas de alta resistência mecânica, de maior densidade, pode-se fazer uma associação com os denominados “grautes”, os quais permitem obter consistência fluida, altas resistências iniciais e finais e expansão controlada. Devido a tais propriedades, os grautes são comumente empregados em preenchimento de vazios confinados ou semiconfinados em locais de difícil acesso.

Conforme citado no início deste capítulo e segundo o documento de revisão *Standard Specifications for Road and Bridge Construction* de 30 de agosto de 2002, as argamassas fluidas consistem em uma mistura de cimento Portland, agregado miúdo, aditivo químico – do tipo incorporador de ar – e água, podendo ainda ser adicionado à mistura subprodutos industriais, conforme foi citado acima.

O produto incorporador de ar adicionado à argamassa de cimento e areia confere-lhe, no estado fresco, uma mobilidade maior, implicando em aumento significativo da trabalhabilidade, com melhoria da plasticidade. Por consequência, permite obter reduções da quantidade de água (fa/c).

A elevada fluidez obtida não traz prejuízos à coesão da mistura, uma vez que a inclusão das bolhas de ar geradas pelo aditivo aumenta a retenção de água da argamassa e reduz a sua exsudação.

As microbolhas possuem uma zona de distribuição geométrica contínua que cobre a dos cimentos e das areias finas. Assim, permitem maior coesão entre os agregados e o cimento, evitando a segregação e exsudação durante o transporte e o lançamento.

Os elevados índices de consistência adquiridos pela ação do aditivo incorporado à argamassa, aliados às baixas densidades da mistura, permitem que se obtenha grandes rendimentos na utilização do material fluido.

Deve-se ressaltar que quando as argamassas fluidas são utilizadas para preenchimento de vazios em substituição ao solo, a ASTM – *The American Society for Testing and Materials* estabelece uma relação de normas técnicas para ensaios dessas argamassas. Entre as normas utilizadas, encontram-se:

- ASTM – PS 31-95 – Provisional Standard Test Method for Ball Drop on Controlled Low Strength Material to Determine Suitability for Load Application;
- ASTM – PS 30-95 – Provisional Standard Practise for Sampling Freshly Mixed Controlled Low Strength material;
- ASTM – PS 28-95 – Provisional Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material;
- ASTM – PS 29-95 – Provisional Standard Test Method for Unit Weigh, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Controlled Low Strength Material.

2.3.2 Trabalhabilidade

Segundo DU (2002), a trabalhabilidade é uma das mais importantes propriedades advindas das argamassas fluidas, ou *flowable fill*.

Trabalhabilidade de uma argamassa é uma noção subjetiva, aproximadamente definida como o estado que oferece maior ou menor facilidade nas operações de manuseio. O componente físico mais importante da trabalhabilidade é a consistência, termo que, aplicado à argamassa, traduz propriedades intrínsecas da mistura fresca relacionadas com a mobilidade e a compacidade e o bom rendimento da execução (BAUER, 1985).

CINCOTTO et al (1995) cita que a trabalhabilidade significa facilidade de manuseio, por parte do operário que prepara e aplica a argamassa.

Ainda segundo CINCOTTO (1995), a trabalhabilidade é influenciada pela continuidade da distribuição granulométrica do agregado, seu módulo de finura e forma dos grãos, além do teor de aglomerantes. Está associada com a plasticidade, retenção e exsudação de água, coesão interna, tixotropia, adesão e massa específica. A consistência também está associada a esta série de propriedades, sendo esta a razão de ser utilizada como uma medida de trabalhabilidade.

O coeficiente de uniformidade, módulo de finura e forma dos grãos das areias afetam a trabalhabilidade das argamassas (TRISTÃO, 1995).

A literatura indica que, a trabalhabilidade é alterada, de forma positiva, à medida que decresce o módulo de finura do agregado, mantém-se a continuidade da granulometria e decresce o teor de grãos angulosos (CINCOTTO, 1995).

As argamassas pobres em aglomerantes requerem maior teor de água para promover a trabalhabilidade adequada (SELMO, 1989; CARASEK, 1996).

Os cimentos com elevada superfície específica contribuem para o aumento da plasticidade (CINCOTTO et al, 1995).

Uma argamassa com condições adequadas de trabalhabilidade deve ser estável, e portanto, não apresentar exsudação. A exsudação é uma forma particular de segregação, em que a água da mistura tende a elevar-se à superfície da argamassa recém-aplicada (BAUER, 1985).

Ainda de acordo com BAUER (1985), o fenômeno de exsudação propicia a ocorrência de:

- Camada de argamassa porosa, fraca e de pouca trabalhabilidade, quando o topo da camada tornar-se muito úmido e a água for impedida de se evaporar;
- Enfraquecimento da aderência pasta-agregado, em alguns pontos;
- Aumento da permeabilidade.

2.3.3 Estudo da Consistência

A consistência é a propriedade da argamassa pela qual esta tende a resistir à deformação e, a manutenção da consistência com o tempo diz respeito à capacidade da argamassa manter esta tendência ao longo do tempo de aplicação (CINCOTTO, 1995).

Segundo BAUER (1985), a consistência é definida como “a relativa mobilidade ou facilidade de a argamassa escoar”, e depende fundamentalmente da compacidade e da mobilidade.

BAUER, 1985, define as propriedades de compacidade e mobilidade:

- Compacidade: “propriedade que determina a quantidade de trabalho interno necessária à completa compactação da argamassa fresca”.
- Mobilidade: “propriedade inversamente proporcional à resistência interna à deformação, e depende das características de ângulo de atrito interno, coesão e viscosidade.

CINCOTTO (1995) cita que diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em argamassas secas, plásticas ou fluidas. Esta classificação baseia-se na situação da película da pasta que envolve os grãos do agregado. Na argamassa seca, a pasta preenche os vazios entre os grãos do agregado, os quais permanecem em contato. A argamassa plástica constitui-se de uma fina película de pasta que atua como lubrificante na superfície dos grãos de agregado e a argamassa fluida caracteriza-se pela imersão dos grãos de agregado na pasta.

Os principais fatores intervenientes da consistência são a relação água/aglomerante; relação aglomerante/areia; granulometria da areia e natureza e qualidade do aglomerante.

2.3.4 Coesão e Tixotropia

Segundo CINCOTTO et al (1995), a coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta aglomerante. A tixotropia é a propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas reversíveis, do estado sólido

para o estado de gel. O estado de gel, no caso das argamassas, diz respeito à massa coesiva de aglomerante na pasta, mais densa após a hidratação.

2.3.5 Plasticidade

Além da consistência, outra propriedade que caracteriza a trabalhabilidade das argamassas é a plasticidade.

CINCOTTO et al (1995) define a plasticidade como a propriedade pela qual a argamassa tende a reter a deformação, após a redução do esforço de deformação. É influenciada pelo teor de ar, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

2.3.6 Porosidade

PINTO (1986), define a porosidade como uma característica geométrica do sólido que apresenta vazios internos e/ou superficiais. De uma forma geral, os sólidos apresentam poros abertos, onde irão ocorrer os fenômenos de capilaridade e permeabilidade. A porosidade dos materiais de construção proporciona a passagem ou permanência da água e, conseqüentemente, as modificações de propriedades dos sólidos.

AÏTCIN (2000) cita que, para reduzir a porosidade de uma pasta de cimento hidratado, é necessário reduzir, tanto quanto possível, a quantidade de ar incorporado e a relação água/cimento na pasta fresca de cimento. Segundo o autor, isso tem que ser conseguido enquanto a pasta fresca permanece fluida o bastante para dar à mistura a trabalhabilidade necessária ao transporte e aplicação.

2.3.7 Permeabilidade

A porosidade da argamassa contempla os vazios presentes no material, os quais podem ser originários de causas diversas (excesso de água de mistura necessária à obtenção de

trabalhabilidade conveniente; diminuição de volume absoluto que acompanha a hidratação dos constituintes do cimento; ar incorporado eventualmente ou propositadamente à mistura e fissuras). A interligação desses vazios permite que a argamassa seja suscetível à penetração de líquidos e gases, devido à propriedade de permeabilidade.

Segundo BAUER (1985), a permeabilidade se exprime pela quantidade de água que atravessa uma superfície unitária, numa espessura unitária durante a unidade de tempo, e sob pressão unitária. No entanto, a caracterização segundo a permeabilidade está sujeita a um grande número de parâmetros, alguns deles de difícil qualificação e identificação física.

Fatores como redução da relação água/cimento, controle da proporção de finos presentes na mistura, cuidados na cura e eventuais empregos de certos aditivos permitem obter impermeabilidades mais elevadas. O tamanho máximo de agregado também exerce influência sobre a permeabilidade, sendo esta tanto maior quanto maior for o tamanho máximo do agregado. Assim, as argamassas são menos permeáveis que os concretos (NEVILLE, 1982).

2.3.8 Resistência à Compressão / Resistência à Tração

A resistência à compressão da pasta de cimento hidratada é muito maior do que a resistência à tração porque, sob tração, o material pode romper pela rápida propagação de uma falha ou microfissura. Como um certo número de fissuras de tração devem coalescer para causar uma ruptura por compressão, na compressão, muito mais energia é necessária para a formação e a propagação do sistema de microfissuras. Assumindo que a ruptura à compressão é uma multiplicidade de diversas rupturas à tração, a teoria de ruptura à tração de Griffith e os conceitos da mecânica do “continuum” podem ser usados para predizer que a resistência à compressão de uma cerâmica homogênea é oito vezes a sua resistência à tração. Essa relação entre as resistências à compressão e à tração aplica-se muito bem ao concreto e argamassa (AİTCIN, 2000).

Segundo BOYTON e GUTSCHICK (1964) elevados teores de ar incorporado diminuem a resistência de aderência à tração. Valores acima de 16% tornam as resistências bastante baixas.

Isso pode ser explicado pela grande quantidade de bolhas de ar microscópicas no plano de aderência, diminuindo o contato íntimo argamassa/substrato.

Além do teor de ar, o tipo de agente incorporador de ar e o tamanho das bolhas influenciam na aderência. Bolhas menores e de distribuição uniforme na argamassa favorecem a resistência de aderência.

AİTCIN (2000) cita que, em geral, a resistência à compressão diminui com o aumento do tamanho dos poros e aumenta com a diminuição do tamanho do grão. A presença de falhas ou impurezas, gerando heterogeneidades, acarreta perda de resistência.

Segundo BENINGFIELD (1988), se as argamassas receberem teores de ar incorporado entre 20 e 25% torna-se perceptível uma redução em suas resistências. Entre percentuais de 15 e 20%, para a maioria do tipo de ar incorporado, pode haver uma pequena redução das propriedades no estado endurecido, sendo assim, recomenda um máximo de 20% para o teor de ar incorporado.

Por fim, das características apresentadas, a consistência, a densidade e a resistência à compressão são as principais propriedades necessárias para o conhecimento das argamassas fluidas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo experimental teve início com a caracterização física das matérias primas empregadas, ou seja, o cimento Portland, o agregado miúdo (areia) e o aditivo.

Em seguida procedeu-se à determinação do tempo ideal de mistura, que no caso, foi considerado como sendo o tempo de estabilização da incorporação de ar. Esta situação pode ser visualizada na figura 9.

Na seqüência, foram realizados vários tipos de traço de argamassa, determinando-se as suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido.

No intuito de minimizar interferências climáticas, variações de umidade ou influências indesejáveis, tomou-se o cuidado de utilizar lotes únicos de materiais. Os ensaios foram realizados nas instalações de laboratório de materiais de construção da empresa Controlnort Engenharia de Controle, em Maringá – PR, sendo as instalações devidamente climatizadas, com temperatura de $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar $(65 \pm 2) \%$, sendo padronizado um procedimento de execução para a confecção das argamassas.

3.1 Caracterização dos materiais empregados

3.1.1 Cimento Portland

Os tipos de cimento utilizados foram o CII – F – 32 e o CPV – ARI – RS, ambos da Companhia de Cimento Itambé, os quais são os mais utilizados na região de Maringá – Paraná.

Para a determinação de sua massa específica foi utilizado o procedimento descrito na NBR 6474/84.

Para complementar sua caracterização física foram realizados ainda os ensaios de resistência à compressão (NBR 7215/96), tempos de pega (NBR 11581/91) e finura (NBR 11579/91).

A caracterização química foi determinada no laboratório da companhia de cimento e apresenta-se no ANEXO A, juntamente com os resultados dos ensaios físicos.

3.1.2 Agregado miúdo

Utilizou-se como agregado miúdo uma areia fina, adquirida de uma jazida procedente do Rio Paraná, na região noroeste do Paraná.

A massa unitária do agregado miúdo em estado solto foi obtida de uma média de três determinações, utilizando-se um recipiente paralelepípedo de material metálico, com volume de 15 dm³, conforme NBR 7251 / 82.

A caracterização do agregado miúdo foi complementada com os ensaios de análise granulométrica (NBR 7217 / 87), massa específica real (NBR 9776 / 87), material pulverulento (NBR 7219 / 87), impurezas orgânicas (NBR 7220 / 87) e torrões de argila (NBR 7218 / 87). Os ensaios foram executados conforme procedimentos padronizados pelas normas supracitadas.

Os resultados obtidos desses ensaios encontram-se no ANEXO A.

3.1.3 Aditivo Incorporador de Ar

O aditivo utilizado foi o Chryso BR, de fabricação da indústria francesa Chryso, vendido comercialmente como incorporador de ar., ou seja, do tipo IAR.

Os ensaios de caracterização do aditivo foram realizados pelo fabricante, o qual forneceu resultados de sua natureza, densidade, cor, pH, teor de íons cloreto (Cl⁻) e teor de sólidos.

Os resultados foram fornecidos pelo fabricante e apresentam-se no ANEXO A.

3.2 Metodologia de produção das argamassas

Considerando que as argamassas em estudo destinam-se à serviços de terraplenagem e pavimentação, especialmente o preenchimento de vazios, e que para tais serviços não são exigidas resistências à compressão elevadas, adotou-se um intervalo de traço variando de 1:6 a 1:22 (cimento:teor de agregados) todos em peso.

Em relação à quantidade de aditivo, as recomendações apresentadas no catálogo do fabricante indicam valores que giram em torno de 1,5% sobre o consumo de cimento. No entanto, é tema principal desse trabalho avaliar os incrementos percentuais do aditivo nas características físicas da argamassa. Desta forma, foram dosadas argamassas com teores de aditivos iguais a 0,0%, 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% sobre o consumo de cimento.

Com o intuito de avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades físicas da argamassa, foram estudadas duas famílias distintas, denominadas “1” e “2”, com os cimentos CPII – F – 32 e CPV – ARI – RS, respectivamente. Ambas as famílias compreenderam uma matriz de 5 x 5 (teor de agregado x teor de aditivo), resultando em um total de 25 traços cada.

Foram confeccionados traços com teores de agregado iguais a 6, 10, 14, 18 e 22, para um de cimento, sendo que os cinco primeiros traços de cada teor, denominados de “argamassa de referência” não foram incrementados com aditivo (teor de aditivo igual a 0,0%). Para os demais foram realizadas dosagens com incrementos de aditivo em proporções de 1,5%, 3,0%, 4,5% e 6,0% sobre o consumo de cimento gerado.

A fim de verificar o desempenho do aditivo, foi fixada a consistência inicial da argamassa, adicionando-se água até obter o abatimento (NBR 7223 / 82) de 20 ± 10 mm, resultando em relações água/aglomerante diferenciadas para cada consumo de cimento.

Como equipamento de mistura foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade nominal do tambor de 120 litros, carga de trabalho de 50 litros e 46 rotações por minuto.

Visando avaliar o tempo de estabilização da incorporação de ar na mistura, desenvolveu-se um traço 1:14 (cimento:teor de agregados), empregando-se 1,5% de aditivo incorporador de ar em relação à massa de cimento.

O procedimento adotado para tanto foi a retirada de porções da amostra da argamassa a cada cinco minutos de mistura, após a introdução do aditivo, e calculado o teor de ar incorporado pelo método gravimétrico. Assim pôde-se observar que entre dez e quinze minutos a quantidade de ar incorporado permaneceu constante, e portanto, optou-se pelo tempo de dez minutos de mistura padrão para todas as argamassas pesquisadas.

Ressalta-se que variações no tipo de aditivo e de betoneira poderão exigir ajustes para o tempo ideal de mistura.

O procedimento de mistura para a confecção das argamassas resumiu-se nas seguintes etapas:

- Segundo procedimento proposto por HELENE e TERZIAN (1993), inicialmente imprimou-se a betoneira com porção de calda de cimento, no traço 1:3 (cimento:água) empregando-se o cimento de pesquisa. Deixou-se o material excedente cair livremente, quando a betoneira estava com a abertura para baixo e em movimento.
- Com o auxílio de uma balança com precisão de 0,1g, determinou-se a massa de areia seca ao ar e em seguida colocou-se na betoneira.
- Realizou-se a determinação da massa de cimento em balança com precisão de 0,1g e colocou-se na betoneira.
- Fez-se a pré-mistura da areia com cimento por aproximadamente 30 segundos.
- Com vistas a ajustar o abatimento inicial, foi-se adicionando água gradativamente, de maneira empírica e visual, utilizando-se da experiência do pesquisador.

- Em seguida, através do ensaio de abatimento do tronco de cone, verificou-se se a consistência estava dentro do valor estabelecido para essa pesquisa (20 ± 10 mm), conforme Figura 8.



FIGURA 8 – Realização do ajuste inicial da consistência da argamassa, através do ensaio de abatimento do tronco de cone.

- Então determinou-se, em proveta com precisão de 1ml, o volume de aditivo a ser adicionado, levando-se em consideração que sua densidade é aproximadamente igual a 1 kg/dm^3 . Uma vez que se tratava de uma quantidade pequena de aditivo, adotou-se a diluição do mesmo em 100ml de água para todos os traços, a fim de garantir seu total aproveitamento.
- Iniciou-se a mistura e após 10 minutos retirou-se uma porção de amostra para determinar suas propriedades.

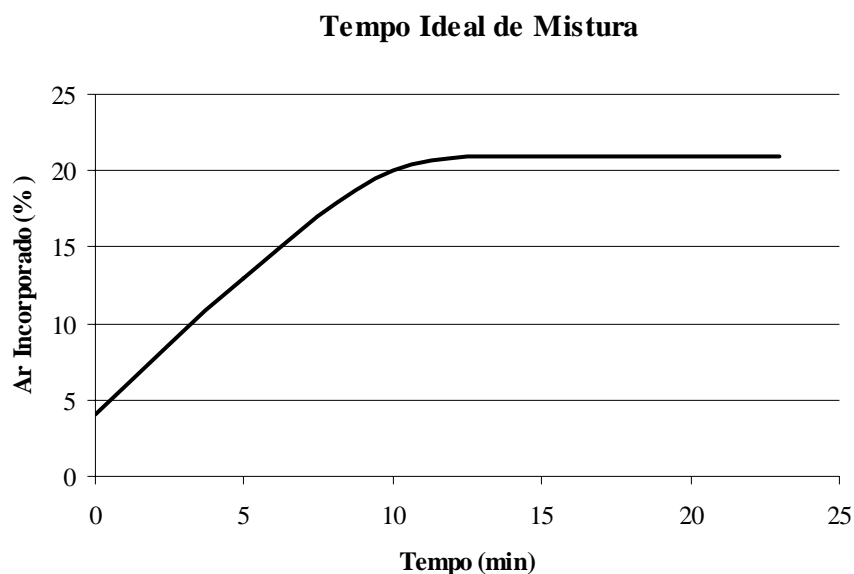


FIGURA 9 – Porcentagem de ar incorporado x tempo de mistura.

3.3 Ensaios no estado fresco

As propriedades das argamassas no estado fresco são fortemente influenciadas pelo o tempo decorrido após o término da mistura. Prevendo esta influência, a norma britânica BS 4551: Part1: 1998 recomenda a execução dos testes imediatamente após a conclusão da mistura, em um prazo máximo de 30 minutos, visto que os resultados podem ser alterados em valores expressivos com o decorrer do tempo (CALHAU 2000).

Os ensaios realizados na argamassa em estado fresco foram o ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, a determinação da densidade de massa e a determinação do teor de ar incorporado.

3.3.1 Avaliação da trabalhabilidade

O ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizado segundo a NBR 7223 / 82, sendo realizado após uma adequada limpeza e umedecimento interno do molde, que por sua vez estava apoiado em superfície rígida, plana e horizontal.

O preenchimento do molde foi feito em três camadas de volumes aproximadamente iguais, adensadas com 25 golpes da haste de socamento uniformemente distribuídos.

Considerou-se como resultado do abatimento do tronco de cone a distância entre o plano correspondente à base superior do molde e o centro da base superior da amostra abatida, medida com régua metálica, conforme ilustrado na Figura 10.



FIGURA 10 – Realização do ensaio de abatimento do tronco de cone após a adição do aditivo.

3.3.2 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

A determinação do teor de ar incorporado foi realizada através do método gravimétrico, que consiste em comparar a massa específica da argamassa fresca contendo ar, com a massa específica da argamassa fresca sem ar (calculada teoricamente).



FIGURA 11 – Ensaio de determinação da massa específica da argamassa através do método gravimétrico.

Para que pudesse realizar-se uma comparação coerente, todos os ensaios de determinação do teor de ar incorporado necessitariam ser iniciados com o mesmo tempo após a mistura. Nessa pesquisa a determinação da massa específica aparente foi realizada imediatamente após o término da mistura.

A determinação da densidade de massa no estado fresco foi calculada com a fórmula abaixo:

$$A = \frac{M_c - M_f}{V_r}$$

Onde:

A = densidade de massa da argamassa em g/cm³, com aproximação de 0,01 g/cm³

M_c = massa do recipiente cilíndrico, contendo a argamassa de ensaio, em g

M_r = massa do recipiente cilíndrico vazio, em g

V_r = volume do recipiente cilíndrico, em cm³

A densidade de massa teórica das argamassas é calculada em função da massa específica dos materiais constituintes e de suas proporções no traço, conforme a equação abaixo:

$$B = \frac{\sum M_i}{\sum \frac{M_i}{\delta_i}}$$

Onde:

M_i = massa dos componentes da argamassa, inclusive a massa da água

δ_i = densidade de massa de cada componente da argamassa, determinada conforme NBR 6474/84.

A partir da determinação da densidade de massa no estado fresco e da determinação das massas específicas do cimento e do agregado, os teores de ar incorporado foram calculados segundo a equação abaixo (NBR 13278 / 95).

$$A_i = 100 \left(1 - \frac{A}{B} \right)$$

Onde:

A_i = teor de ar incorporado em porcentagem

A = densidade de massa da argamassa em estado fresco em g/cm³

B = densidade de massa teórica da argamassa em estado fresco sem vazios, em g/cm³

3.4 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios realizados na argamassa em estado endurecido foram o de resistência à compressão e o de resistência à tração por compressão diametral, para os quais considerou-se somente a idade de 28 dias.

3.4.1 Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão foi realizada conforme NBR 13279/ 95, com moldagem de 4 corpos de prova.

Para a moldagem, optou-se pelo corpo de prova com dimensões de 10cm de diâmetro por 20cm de altura, já que o de 5x10cm (diâmetro x altura) sofria algumas fragmentações ao ser desformado e o de 15x30 cm demandaria grandes volumes de argamassa.

O procedimento adotado para o preenchimento dos moldes metálicos de 10cm de diâmetro por 20cm de altura foi realizado conforme descrito na NBR 13278 / 95. Desta forma, os corpos de prova foram preenchidos em três camadas e receberam 20 golpes por camada.

Após o preenchimento, aguardou-se o período de 24 horas e então os corpos de prova foram desformados, tomando-se o cuidado para não promover a quebra de suas arestas. Em seguida, foram levados para o tanque de cura, imersos em água com temperatura controlada, onde permaneciam até completar 27 dias. Ainda úmidos realizou-se a regularização das faces de aplicação de carga, ou seja, fez-se o capeamento com enxofre, de maneira que as faces ficassem planas e paralelas.

Para a determinação da carga de ruptura do corpo de prova, tomou-se o cuidado de centralizar o corpo de prova nos pratos da prensa e aplicar a carga de maneira contínua, sem choques e com velocidade constante (3 kgf/cm^2 a 8 kgf/cm^2 por segundo), cessando o carregamento somente quando o recuo do ponteiro de carga fosse em torno de 10% do valor da carga máxima alcançada.

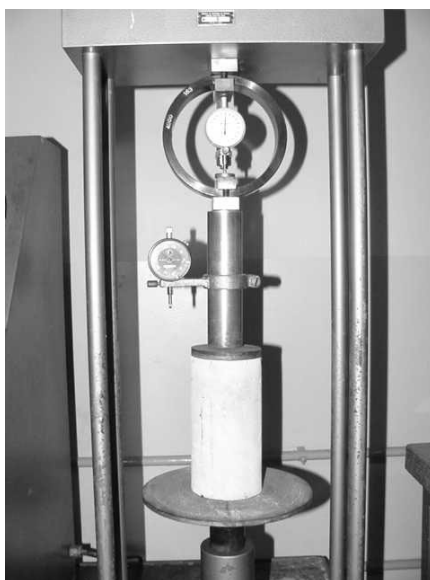


FIGURA 12 – Ensaio de determinação da resistência à compressão.

A tensão de ruptura à compressão foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova.

3.4.2 Resistência à tração

Considerando que a determinação da resistência à tração pura de uma argamassa é um ensaio lento, caro e de difícil realização, pois exige um sistema de fixação eficiente (geralmente através de resina epóxi), com articulações especiais para evitar o aparecimento de tensões secundárias, a resistência à tração dos corpos de prova foi realizada de maneira indireta, ou seja, por compressão diametral (Método Lobo Carneiro). (NBR 7222/1994)

A execução dos ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada conforme NBR 7222 / 94, utilizando quatro corpos de prova, moldados da mesma maneira que os usados para a determinação da resistência à compressão.

O ensaio consistiu na aplicação de tensões de compressão no sentido diametral dos corpos de prova, colocados em posição horizontal na prensa, gerando-se tensões de tração no interior do corpo de prova.

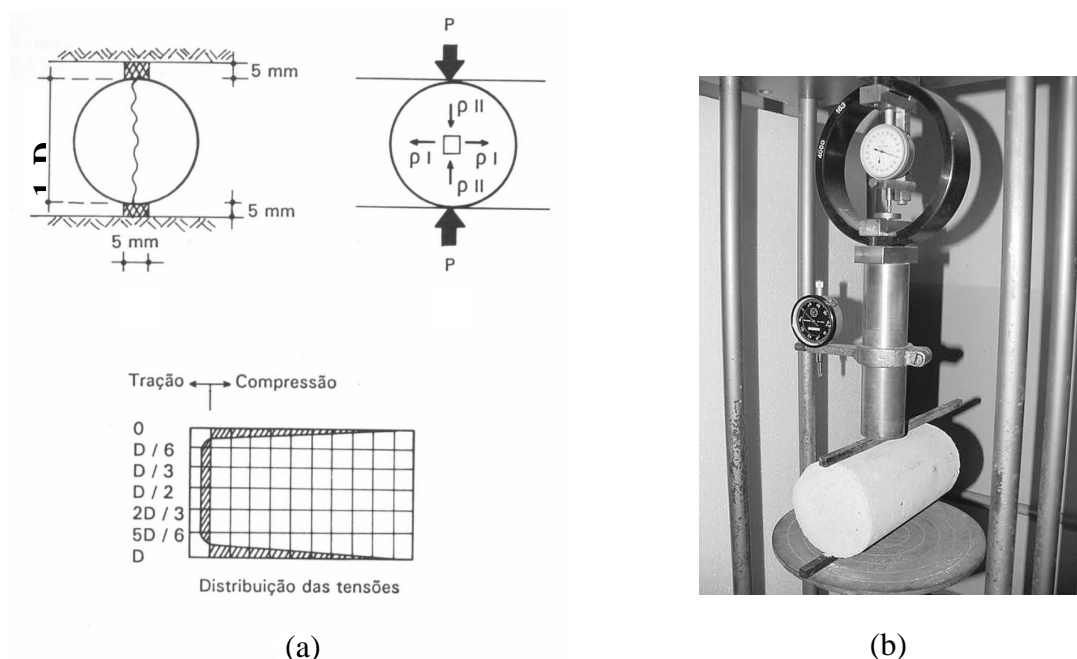


FIGURA 13 – Ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral.

(a) Princípio do ensaio e (b) rompimento do corpo de prova.

Os resultados foram calculados pela equação que segue:

$$f_{t,d} = \frac{2.F}{\pi.d.l}$$

Onde:

$f_{t,d}$ = resistência à tração por compressão diametral, expresso em MPa, com aproximação de 0,05.

F = carga máxima obtida no ensaio, em KN.

d = diâmetro do corpo de prova, em cm.

l = altura do corpo de prova, em cm.

3.5 Modelo estatístico de avaliação

Um planejamento de experimentos consiste em ensaios para investigar um processo produtivo ou um determinado sistema, em que são alteradas as variáveis de entrada e observadas as respostas obtidas, com o objetivo de determinar as variáveis que mais influenciam no resultado de um determinado processo (MONTGOMERY, 1991).

Neste estudo, foi utilizado um planejamento de experimento estatístico, que é um modo de controlar fontes de variabilidade e assegurar que o experimento forneça informações mais precisas sobre as respostas de interesse.

Para avaliar as variáveis teor de agregado, teor de aditivo e cimento na resistência à compressão e na resistência à tração por compressão diametral foi utilizado um experimento fatorial completo 2 x 4 x 5 com quatro repetições; e para avaliar estas mesmas variáveis no abatimento, espalhamento e teor de ar incorporado de foi utilizado um experimento fatorial completo 2 x 4 x 5. Isto é, foram considerados cinco níveis para a variável teor de agregado (6, 10, 14, 18, 22), quatro níveis para a variável teor de aditivo (1,5%, 3,0%, 4,5%, 6,0%) e dois níveis para a variável cimento (CPII – F – 32 e CPV – ARI – RS) que serão denominados fator 1, fator 2 e fator 3, respectivamente. Para simplificar a notação, os níveis dos fatores foram codificados conforme Tabela 1.

TABELA 1 – Níveis dos fatores para o experimento 2x4x5.

Teor de agregado (kg)	Teor de aditivo (%)	Cimento
6	1,5	1
10	3	2
14	4,5	
18	6	
22		

* Cimento 1 – CII – F - 32

Cimento 2 – CPV – ARI - RS

O objetivo é testar hipóteses sobre o efeito dos fatores nas variáveis observadas. Para os testes de hipóteses, os erros no modelo serão considerados distribuídos conforme uma distribuição normal com média zero e variância σ^2 (σ^2 será estimada pelo quadrado médio dos erros na análise de variância). Esta suposição será verificada através da análise dos resíduos.

Inicialmente, foram realizadas análises de variâncias para os modelos, uma para cada variável resposta, com o objetivo de verificar se os fatores estudados exercem efeitos significativos sobre a variável resistência à compressão e sobre a variável resistência à tração por compressão diametral com auxílio do programa estatístico SAS (SAS Software Release 8.2, Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2002). Isto é, testar a hipótese de que as médias das variáveis respostas nos diferentes níveis dos fatores são iguais. Foi também realizada uma análise dos resíduos através dos gráficos de probabilidade e este demonstrou que os erros seguem aproximadamente uma distribuição normal (ANEXO C).

Em seguida, para os efeitos significantes foram aplicados testes de Tukey e de Duncan para comparar as médias das variáveis respostas nos níveis dos fatores. Os testes são realizados para verificar quais as médias das variáveis respostas, nos diferentes níveis do fator, diferem entre si.

Para as variáveis resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral, os ensaios foram conduzidos a partir do planejamento fatorial completo 2 x 4 x 5, com quatro repetições, totalizando 160 experimentos, os quais foram conduzidos aleatoriamente. Os resultados observados serão representados pelo seguinte modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad k = 1, 2 \quad e \quad l = 1, 2, 3, 4$$

Onde:

Y_{ijkl} representa os resultados observados (valores medidos para resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral);

μ é uma média geral;

α_i mede o efeito do i-ésimo nível do fator teor agregado;

β_j mede o efeito do j-ésimo nível do fator % aditivo;

γ_k mede o efeito do k-ésimo nível do fator cimento;

$(\alpha\beta)_{ij}$ mede o efeito de interação entre o i-ésimo nível do fator teor agregado e o j-ésimo nível do fator % aditivo;

$(\alpha\gamma)_{ik}$ mede o efeito de interação entre o i-ésimo nível do fator teor agregado e o k-ésimo nível do fator cimento;

$(\beta\gamma)_{jk}$ mede o efeito de interação entre o j-ésimo nível do fator % aditivo e o k-ésimo nível do fator cimento;

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ mede o efeito de interação entre o i-ésimo nível do fator teor agregado, o j-ésimo nível do fator % aditivo e o k-ésimo nível do fator cimento; e

ε_{ijkl} é um componente aleatório.

Para as variáveis abatimento, espalhamento e ar incorporado, os ensaios foram conduzidos a partir do planejamento fatorial completo $2 \times 4 \times 5$, sem repetições, totalizando 40 experimentos, os quais foram conduzidos aleatoriamente. Os resultados observados serão representados pelo seguinte modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

$$i=1, 2, 3, 4 \quad j=1, 2, 3, 4, 5 \quad e \quad k=1, 2$$

Onde:

Y_{ijk} representa os resultados observados (valores medidos para abatimento, espalhamento e teor de ar incorporado);

μ é uma média geral;

α_i mede o efeito do i-ésimo nível do fator teor agregado;

β_j mede o efeito do j-ésimo nível do fator % aditivo;

γ_k mede o efeito do k-ésimo nível do fator cimento;

$(\alpha\beta)_{ij}$ mede o efeito de interação entre o i-ésimo nível do fator teor agregado e o j-ésimo nível do fator % aditivo;

$(\alpha\gamma)_{ik}$ mede o efeito de interação entre o i-ésimo nível do fator teor agregado e o k-ésimo nível do fator cimento;

$(\beta\gamma)_{jk}$ mede o efeito de interação entre o j-ésimo nível do fator % aditivo e o k-ésimo nível do fator cimento; e

ε_{ijk} é um componente aleatório.

Neste caso, como não há repetições não é possível avaliar a interação entre os 3 fatores pois não há graus de liberdade suficiente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, apresenta-se a nomenclatura adotada e as proporções dos diversos traços pesquisados, com os respectivos teores de aditivo e de agregado utilizados (Tabelas 2 e 3).

A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$ onde i é a família a qual pertence, ou seja Família 1 (cimento CPII – F – 32) ou Família 2 (cimento CPV – ARI – RS); j é o teor de agregado utilizado no traço; e k é o teor de aditivo, proporcional à massa de cimento.

Apresenta-se também os resultados obtidos dos ensaios realizados, seguidos de análise estatística, tanto para as argamassas no estado fresco quanto no estado endurecido.

Os resultados desses ensaios apresentam-se em tabelas e figuras, de modo a permitir a análise das argamassas pesquisadas, inclusive entre traços distintos.

TABELA 2 - Nomenclatura e proporção dos traços pesquisados para o cimento CPlI - F - 32.

Traço	Aditivo (%)	Traço Unitário em Peso (Kg)				Consumo de cimento (kg/m³)
		Cimento	Areia	Água	Aditivo	
T _{1;6;0,0}	0,0				0,000	249,00
T _{1;6;1,5}	1,5				0,015	201,30
T _{1;6;3,0}	3,0	1,00	6,00	1,07	0,030	205,00
T _{1;6;4,5}	4,5				0,045	208,70
T _{1;6;6,0}	6,0				0,060	205,00
T _{1;10;0,0}	0,0				0,000	150,10
T _{1;10;1,5}	1,5				0,015	127,30
T _{1;10;3,0}	3,0	1,00	10,00	1,96	0,030	128,50
T _{1;10;4,5}	4,5				0,045	127,30
T _{1;10;6,0}	6,0				0,060	129,60
T _{1;14;0,0}	0,0				0,000	104,90
T _{1;14;1,5}	1,5				0,015	91,70
T _{1;14;3,0}	3,0	1,00	14,00	2,78	0,030	92,80
T _{1;14;4,5}	4,5				0,045	94,20
T _{1;14;6,0}	6,0				0,060	93,10
T _{1;18;0,0}	0,0				0,000	79,00
T _{1;18;1,5}	1,5				0,015	72,30
T _{1;18;3,0}	3,0	1,00	18,00	3,47	0,030	71,90
T _{1;18;4,5}	4,5				0,045	72,30
T _{1;18;6,0}	6,0				0,060	73,40
T _{1;22;0,0}	0,0				0,000	66,40
T _{1;22;1,5}	1,5				0,015	59,40
T _{1;22;3,0}	3,0	1,00	22,00	4,87	0,030	59,20
T _{1;22;4,5}	4,5				0,045	59,00
T _{1;22;6,0}	6,0				0,060	59,60

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por T_{*i*; *j*; *k*}, onde *i* é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPlI - F - 32 ou CPV - ARI - RS, *j* é o teor de agregado usado no traço e *k* é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento. A equação utilizada para obtenção do consumo de cimento foi, $C_c = 1000 / ((1 + a + a/c) / \text{densidade aparente})$.

TABELA 3 - Nomenclatura e proporção dos traços pesquisados para o cimento CPV - ARI - RS.

Traço	Aditivo (%)	Traço Unitário em Peso (Kg)				Consumo de cimento (kg/m³)
		Cimento	Areia	Água	Aditivo	
T _{2;6;0,0}	0,0				0,000	246,50
T _{2;6;1,5}	1,5				0,015	215,50
T _{2;6;3,0}	3,0	1,00	6,00	1,07	0,030	212,40
T _{2;6;4,5}	4,5				0,045	203,10
T _{2;6;6,0}	6,0				0,060	219,90
T _{2;10;0,0}	0,0				0,000	147,40
T _{2;10;1,5}	1,5				0,015	134,30
T _{2;10;3,0}	3,0	1,00	10,00	1,96	0,030	130,80
T _{2;10;4,5}	4,5				0,045	127,70
T _{2;10;6,0}	6,0				0,060	130,80
T _{2;14;0,0}	0,0				0,000	104,90
T _{2;14;1,5}	1,5				0,015	97,00
T _{2;14;3,0}	3,0	1,00	14,00	2,78	0,030	95,10
T _{2;14;4,5}	4,5				0,045	93,90
T _{2;14;6,0}	6,0				0,060	93,90
T _{2;18;0,0}	0,0				0,000	80,30
T _{2;18;1,5}	1,5				0,015	76,10
T _{2;18;3,0}	3,0	1,00	18,00	3,47	0,030	72,80
T _{2;18;4,5}	4,5				0,045	75,70
T _{2;18;6,0}	6,0				0,060	74,80
T _{2;22;0,0}	0,0				0,000	68,20
T _{2;22;1,5}	1,5				0,015	68,50
T _{2;22;3,0}	3,0	1,00	22,00	4,87	0,030	62,30
T _{2;22;4,5}	4,5				0,045	58,80
T _{2;22;6,0}	6,0				0,060	61,70

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por T_{*i*; *j*; *k*}, onde *i* é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, *j* é o teor de agregado usado no traço e *k* é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento. A equação utilizada para obtenção do consumo de cimento foi, $C_c = 1000 / ((1 + a + a/c) / \text{densidade aparente})$.

4.1 Abatimento do tronco de cone

Nas Tabelas 4 e 5, apresentam-se os resultados de abatimento do tronco de cone. Os valores apresentados para o abatimento inicial (*1) e final (*2) são referentes à medida realizada antes e após a inclusão do aditivo. Os traços assinalados com (*3) não possuem resultado do abatimento final, pois são as chamadas “argamassas de referência”, as quais não recebem a adição de aditivo. Nas Figuras 14 e 15, apresenta-se esses resultados na forma de gráficos.

Na Tabela 6, apresenta-se a análise de variância. Através dessa análise, constatou-se que os efeitos principais dos fatores cimento e teor de aditivo não são significantes ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, pois suas $Pr > F$ foram maiores que 0,05. Assim, pode-se afirmar que o tipo de cimento e o teor de aditivo não exercem influência sobre o abatimento.

Somente o efeito principal do fator teor de agregado e a interação cimento x teor de aditivo exercem influência sobre o abatimento, já que suas $Pr > F$ foram menores que 0,05 ($p\text{-valor} < 0,05$).

Portanto, as médias para os níveis deste fator foram calculadas, Tabela 7, para observar a mudança que se tem ao passar de um nível para o outro. Os testes de Tukey e de Duncan foram aplicados para verificar se existem diferenças entre as médias das respostas para os diferentes níveis dentro deste fator.

Os resultados dos testes coincidiram e podem ser observados na Tabela 7. As médias com letras diferentes são estatisticamente significantes ao nível de 5% de significância. Portanto, serão consideradas diferentes as médias dos níveis do fator teor de agregado.

A influência da interação será analisada graficamente.

TABELA 4 - Resultados obtidos para argamassa no estado fresco, confeccionada com cimento CPII - F - 32. Abatimento do tronco de cone.

Traço	Abatimento (cm)	
	Inicial *1	Final *2
T _{1;6;0,0} *3	1,0	---
T _{1;6;1,5}	1,5	25,0
T _{1;6;3,0}	1,8	25,5
T _{1;6;4,5}	1,6	27,0
T _{1;6;6,0}	1,6	26,0
T _{1;10;0,0} *3	1,0	---
T _{1;10;1,5}	1,5	24,5
T _{1;10;3,0}	1,6	23,0
T _{1;10;4,5}	1,6	26,5
T _{1;10;6,0}	1,5	24,5
T _{1;14;0,0} *3	1,0	---
T _{1;14;1,5}	1,0	25,0
T _{1;14;3,0}	1,5	16,0
T _{1;14;4,5}	1,5	24,5
T _{1;14;6,0}	1,4	25,5
T _{1;18;0,0} *3	1,0	---
T _{1;18;1,5}	1,0	21,5
T _{1;18;3,0}	1,5	23,5
T _{1;18;4,5}	1,0	23,5
T _{1;18;6,0}	1,4	22,5
T _{1;22;0,0} *3	1,5	---
T _{1;22;1,5}	1,0	24,0
T _{1;22;3,0}	1,5	21,0
T _{1;22;4,5}	1,0	21,5
T _{1;22;6,0}	1,5	23,0

Observações:

*1 Antes da adição do aditivo

*2 Após adição do aditivo

*3 Nesses traços não houve adição de aditivo, portanto, não há medida de abatimento final.

TABELA 5 - Resultados obtidos para argamassa no estado fresco, confeccionada com cimento CPV - ARI - RS.
Abatimento do tronco de cone.

Traço	Abatimento (cm)	
	Inicial *1	Final *2
T _{2;6;0,0} *3	2,0	---
T _{2;6;1,5}	1,6	24,0
T _{2;6;3,0}	1,6	26,0
T _{2;6;4,5}	1,6	27,0
T _{2;6;6,0}	1,6	25,0
T _{2;10;0,0} *3	1,5	---
T _{2;10;1,5}	1,5	25,5
T _{2;10;3,0}	1,5	26,5
T _{2;10;4,5}	1,5	26,0
T _{2;10;6,0}	1,5	26,0
T _{2;14;0,0} *3	1,5	---
T _{2;14;1,5}	1,5	24,0
T _{2;14;3,0}	1,4	26,5
T _{2;14;4,5}	1,4	25,0
T _{2;14;6,0}	1,4	24,5
T _{2;18;0,0} *3	2,0	---
T _{2;18;1,5}	1,5	23,0
T _{2;18;3,0}	1,5	25,0
T _{2;18;4,5}	1,5	25,0
T _{2;18;6,0}	1,5	26,0
T _{2;22;0,0} *3	1,5	---
T _{2;22;1,5}	1,5	20,0
T _{2;22;3,0}	1,5	23,0
T _{2;22;4,5}	1,5	22,0
T _{2;22;6,0}	1,5	21,0

Observações:

*1 Antes da adição do aditivo

*2 Após adição do aditivo

*3 Nesses traços não houve adição de aditivo, portanto, não há medida de abatimento final.

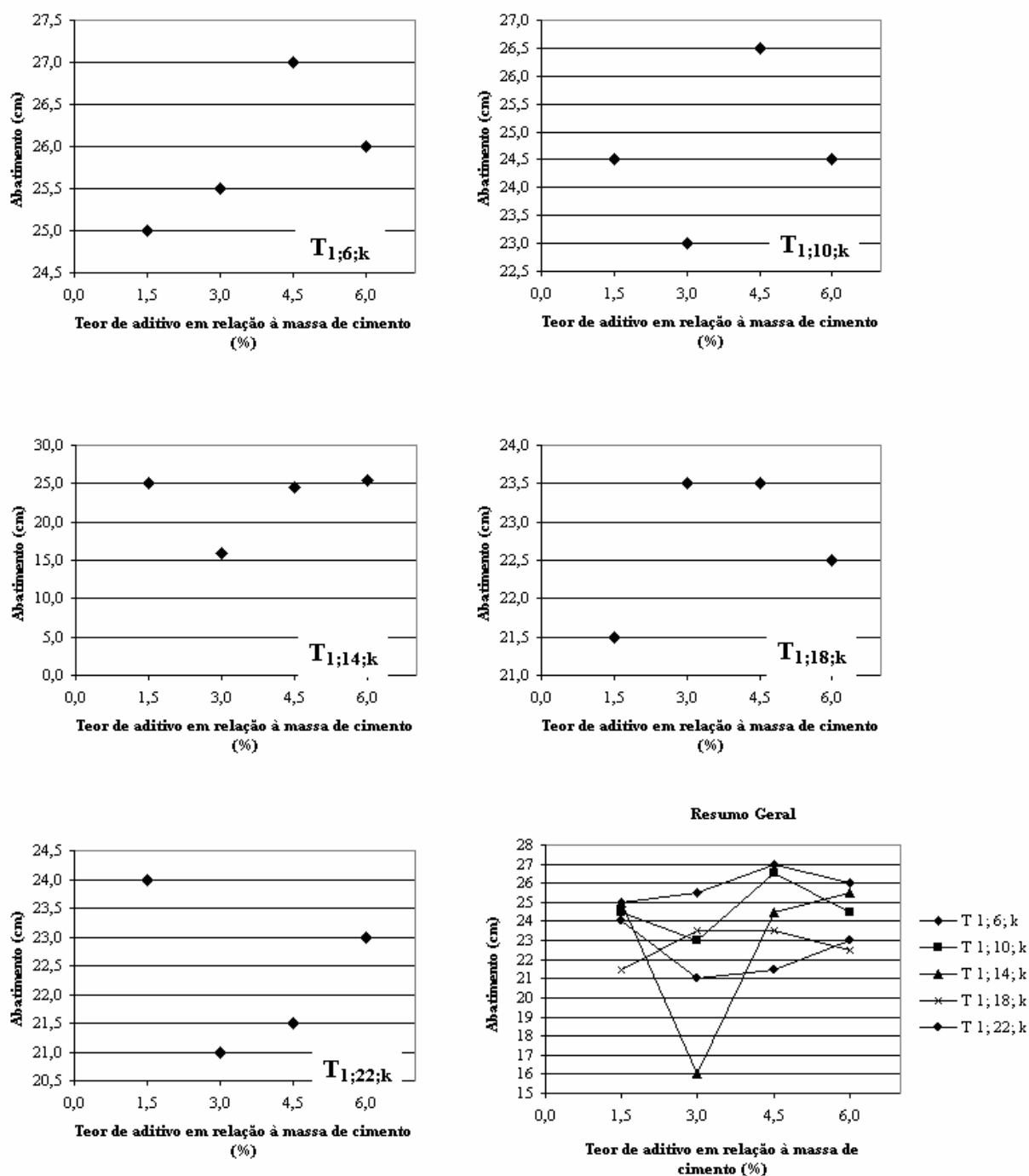


FIGURA 14 - Abatimento nas argamassas confeccionadas com cimento CPII - F - 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

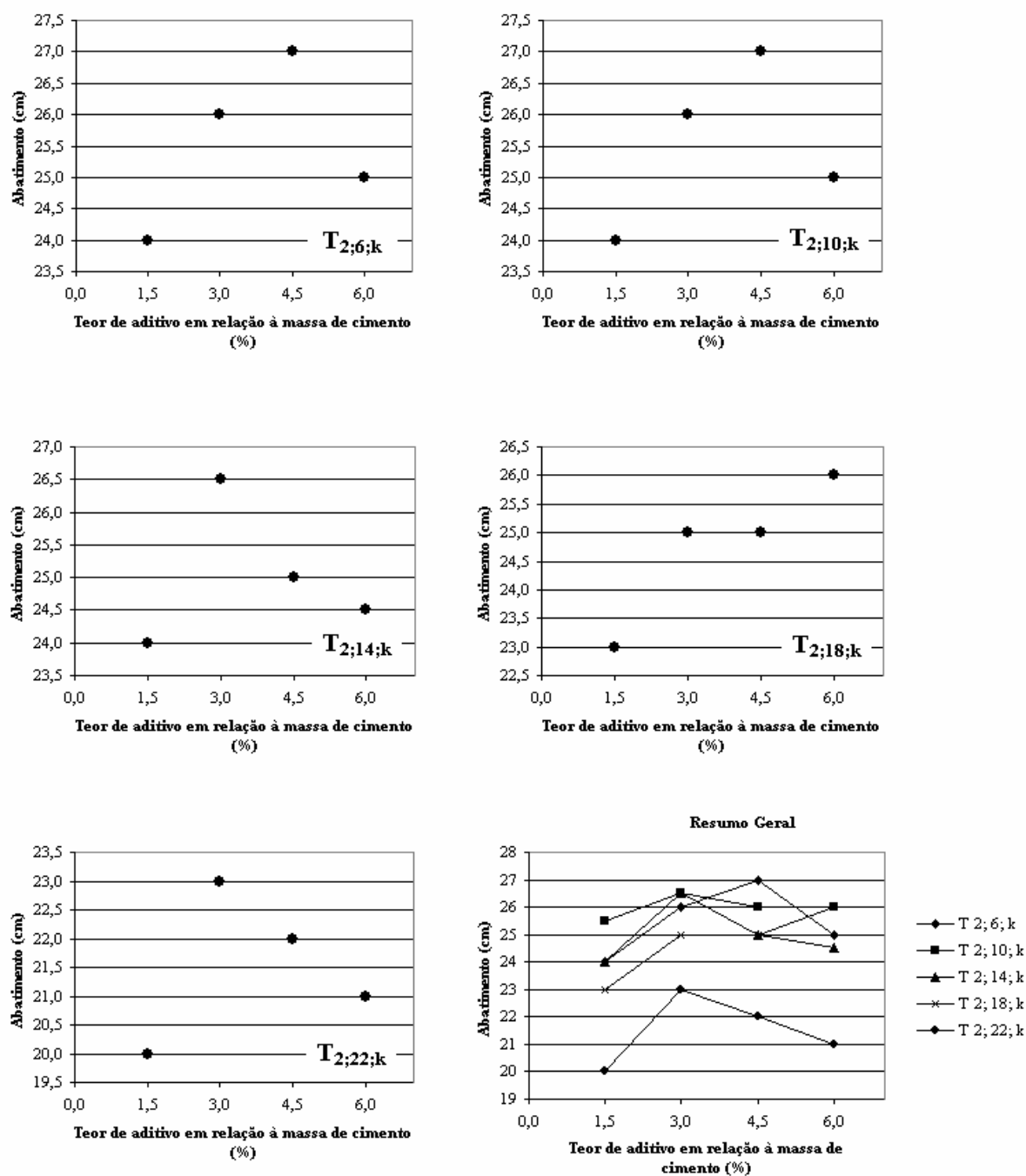


FIGURA 15 - Abatimento nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_i; j; k$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPV - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

TABELA 6 – Análise da variância para o abatimento.

Fonte de variação	Número de Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	Pr > F
Cimento	1	7,656	7,656	2,82	0,1044
% aditivo	3	10,319	3,439	1,27	0,3052
Teor de agregado	4	70,712	17,678	6,51	0,0008
Cimento x % aditivo	3	26,469	26,469	3,25	0,0367
Resíduos	28	76,088	2,717		
Total	39	191,244			

TABELA 7 – Médias do abatimento nos diferentes níveis dos fatores.

Fatores	Níveis	Média
Cimento	1	23,675 a
	2	24,550 a
Teor de Agregado	6	25,687 a
	10	25,312 a
	14	23,875 ab
	18	23,750 b
	22	21,937 b
% aditivo	1,5	23,650 a
	3,0	23,600 a
	4,5	24,800 a
	6,0	24,400 a

Análise do Efeito de interação

A Tabela 8 apresenta as médias do abatimento para os diferentes níveis do fator cimento, fixados os níveis do fator teor de aditivo. Estas médias podem ser visualizadas na Figura 16.

TABELA 8 – Médias do abatimento nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.

Família	% aditivo	Média
1	1,5	24,00
	3,0	21,80
	4,5	24,60
	6,0	24,30
2	1,5	23,30
	3,0	25,40
	4,5	25,00
	6,0	24,50

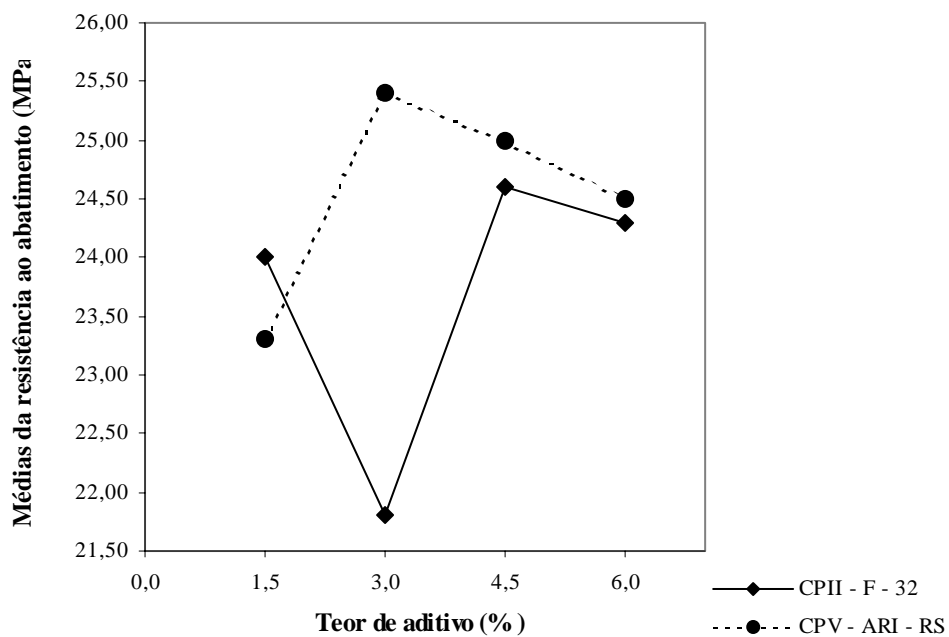


FIGURA 16 – Gráfico das médias do abatimento nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo.

Analisando a figura 16, observou-se que o aumento do teor de aditivo não implicou em valores maiores de abatimento.

Observou-se também que o tipo de cimento não influencia o abatimento, já que para os dois cimentos os abatimentos obtidos são similares. No entanto, nota-se que para 3% de aditivo, utilizando o cimento CII – F – 32, o resultado do abatimento foi discrepante se comparado com os demais. Entende-se que tal ocorrência está relacionada à falhas de leitura.

A trabalhabilidade das argamassas foi identificada com uma avaliação subjetiva, realizada durante sua produção, e com o ensaio de abatimento do tronco de cone, que não se mostrou de maneira satisfatória, uma vez que seus resultados não são de extrema confiabilidade. Os resultados, então, refletem a imprecisão do ensaio, que fica condicionado aos critérios do laboratorista.

A trabalhabilidade medida pelo abatimento do tronco de cone em pesquisas com argamassas fluidas não é procedimento adequado. Fica evidenciada a necessidade de desenvolvimento de metodologia para avaliação deste tipo de argamassa no estado fresco.

Finalmente, pode-se concluir que o teor de aditivo e o tipo de cimento não exercem influência sobre o abatimento do tronco de cone, como já foi afirmado anteriormente. Quanto ao teor de agregado, a melhor escolha para obter maior abatimento é 6 Kg.

4.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Nas Tabelas 9 e 10, apresentam-se os resultados obtidos para a densidade de massa (teórica e aparente) e teor de ar incorporado.

Nas Figuras 17 e 18, correlaciona-se o teor de ar incorporado com o percentual de aditivo adicionado proporcional à massa do aglomerante.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 11, constatou-se que somente os efeitos principais dos fatores teor de agregado e cimento e a interação cimento x teor de aditivo são

significantes, já que todas as $Pr > F$ foram menores que 0,05 ($p\text{-valor} < 0,05$). Isto é, esses fatores exercem influência sobre o teor de ar incorporado.

Portanto, as médias para os níveis dos fatores foram calculadas, possibilitando observar a mudança que se tem ao passar de um nível para o outro (Tabela 12).

Os testes de Tukey e de Duncan foram aplicados para verificar se existem diferenças entre as médias das respostas para os diferentes níveis dentro deste fator.

Os resultados dos testes coincidiram e podem ser observados no Tabela 12. As médias com letras diferentes são estatisticamente significantes ao nível de 5% de significância, ou seja, há diferença de um nível para o outro. Assim, médias com letras iguais não são significantes ao nível de 5% de significância, ou seja, não há diferença de um nível para o outro.

Portanto, serão consideradas diferentes as médias dos níveis do fator cimento e do fator teor de agregado.

A influência da interação será analisada graficamente.

TABELA 9 - Resultados obtidos para as argamassas no estado fresco, confeccionadas com cimento CII – F - 32. Densidade teórica, aparente e teor de ar incorporado.

Traço	Aditivo (%)	Densidade (kg / m ³)		Ar incorporado (%)
		Teórica	Aparente	
T _{1;6;0,0}	0,0	2172,35	2010,00	7,5
T _{1;6;1,5}	1,5	2172,35	1625,00	25,2
T _{1;6;3,0}	3,0	2172,35	1655,00	23,8
T _{1;6;4,5}	4,5	2172,35	1685,00	22,4
T _{1;6;6,0}	6,0	2172,35	1655,00	23,8
T _{1;10;0,0}	0,0	2109,65	1945,00	7,8
T _{1;10;1,5}	1,5	2109,65	1650,00	21,8
T _{1;10;3,0}	3,0	2109,65	1665,00	21,1
T _{1;10;4,5}	4,5	2109,65	1650,00	21,8
T _{1;10;6,0}	6,0	2109,65	1680,00	20,4
T _{1;14;0,0}	0,0	2091,51	1865,00	10,8
T _{1;14;1,5}	1,5	2091,51	1630,00	22,1
T _{1;14;3,0}	3,0	2091,51	1650,00	21,1
T _{1;14;4,5}	4,5	2091,51	1675,00	19,9
T _{1;14;6,0}	6,0	2091,51	1655,00	20,9
T _{1;18;0,0}	0,0	2093,83	1775,00	15,2
T _{1;18;1,5}	1,5	2093,83	1625,00	22,4
T _{1;18;3,0}	3,0	2093,83	1615,00	22,9
T _{1;18;4,5}	4,5	2093,83	1625,00	22,4
T _{1;18;6,0}	6,0	2093,83	1650,00	21,2
T _{1;22;0,0}	0,0	2038,55	1850,00	9,3
T _{1;22;1,5}	1,5	2038,55	1655,00	18,8
T _{1;22;3,0}	3,0	2038,55	1650,00	19,1
T _{1;22;4,5}	4,5	2038,55	1645,00	19,3
T _{1;22;6,0}	6,0	2038,55	1660,00	18,6

TABELA 10 - Resultados obtidos para as argamassas no estado fresco, confeccionadas com cimento CPV – ARI - RS. Densidade teórica, aparente e teor de ar incorporado.

Traço	Aditivo (%)	Densidade (kg / m ³)		Ar incorporado (%)
		Teórica	Aparente	
T _{2;6;0,0}	0,0	2171,20	1990,00	8,4
T _{2;6;1,5}	1,5	2171,05	1740,00	19,9
T _{2;6;3,0}	3,0	2171,05	1715,00	21,0
T _{2;6;4,5}	4,5	2171,05	1640,00	24,5
T _{2;6;6,0}	6,0	2171,05	1775,00	18,2
T _{2;10;0,0}	0,0	2108,89	1910,00	9,4
T _{2;10;1,5}	1,5	2108,89	1740,00	17,5
T _{2;10;3,0}	3,0	2108,89	1695,00	19,6
T _{2;10;4,5}	4,5	2108,89	1655,00	21,5
T _{2;10;6,0}	6,0	2108,89	1695,00	19,6
T _{2;14;0,0}	0,0	2090,96	1865,00	10,8
T _{2;14;1,5}	1,5	2090,96	1725,00	17,5
T _{2;14;3,0}	3,0	2090,96	1690,00	19,2
T _{2;14;4,5}	4,5	2090,96	1670,00	20,1
T _{2;14;6,0}	6,0	2090,96	1670,00	20,1
T _{2;18;0,0}	0,0	2093,40	1805,00	13,8
T _{2;18;1,5}	1,5	2093,40	1710,00	18,3
T _{2;18;3,0}	3,0	2093,40	1635,00	21,9
T _{2;18;4,5}	4,5	2093,40	1700,00	18,8
T _{2;18;6,0}	6,0	2093,40	1680,00	19,8
T _{2;22;0,0}	0,0	2037,99	1900,00	6,8
T _{2;22;1,5}	1,5	2037,99	1910,00	16,3
T _{2;22;3,0}	3,0	2037,99	1735,00	14,9
T _{2;22;4,5}	4,5	2037,99	1640,00	19,5
T _{2;22;6,0}	6,0	2037,99	1720,00	15,6

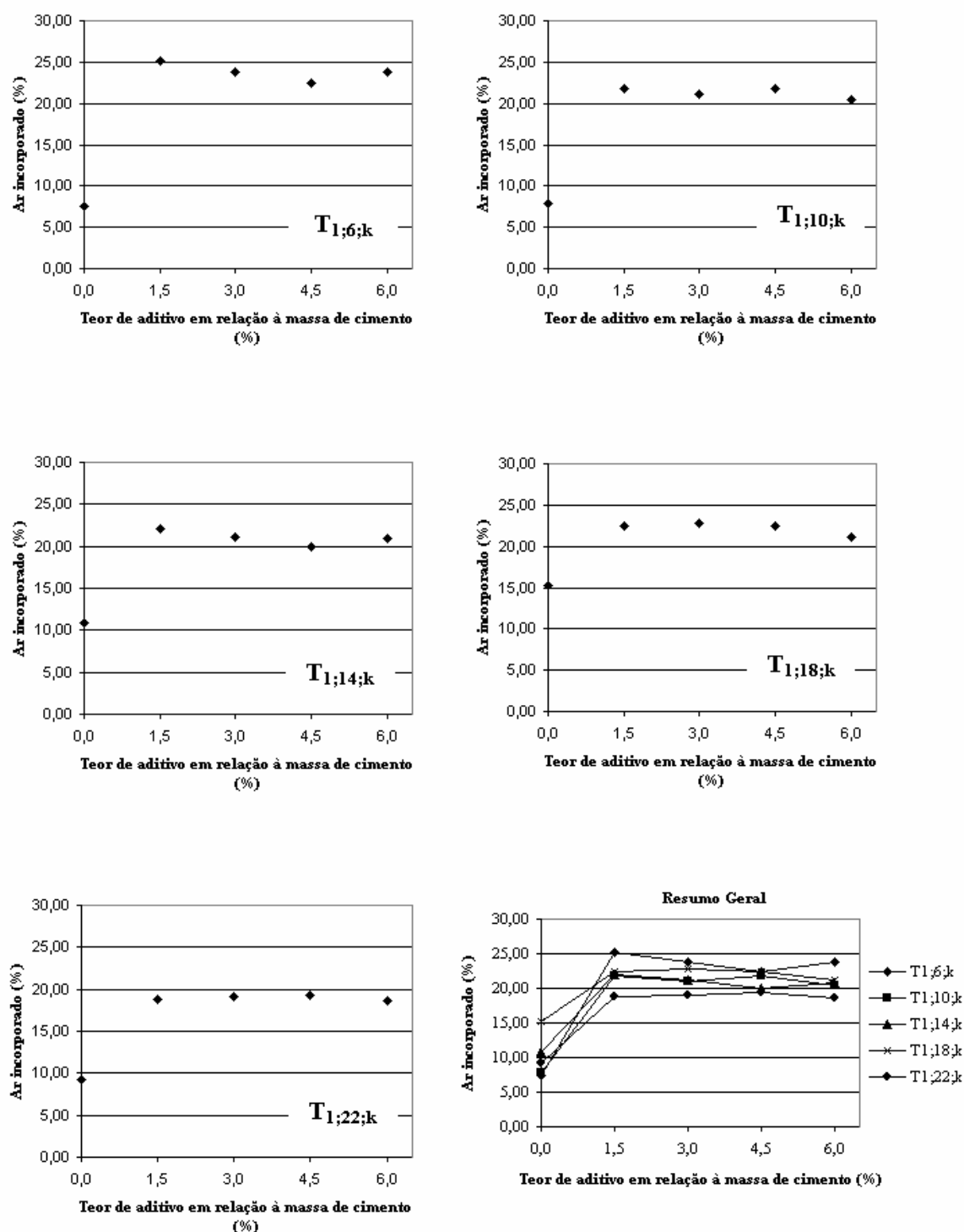


FIGURA 17 - Teor de ar incorporado nas argamassas confeccionadas com cimento CPII - F - 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

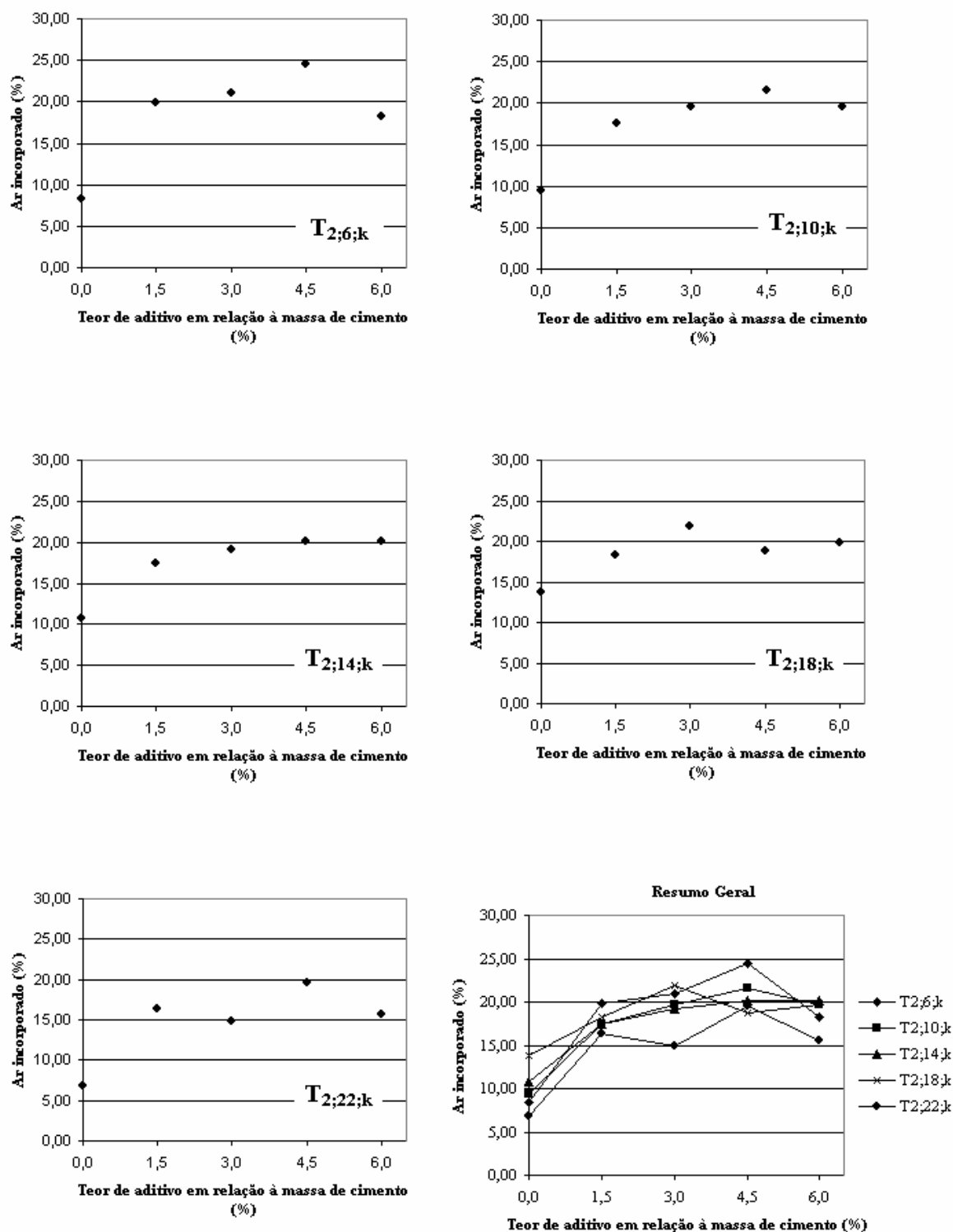


FIGURA 18 - Teor de ar incorporado nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

TABELA 11 – Análise da variância para o teor de ar incorporado.

Fonte de variação	Número de Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	Pr > F
Cimento	1	50,760	50,760	37,68	< 0,0001
% aditivo	3	8,913	2,970	2,21	0,1096
Teor de agregado	4	89,361	22,340	16,58	< 0,0001
Cimento x % aditivo	3	18,886	6,295	4,67	0,0091
Resíduos	28	37,718	1,347		
Total	39	205,639			

TABELA 12 – Médias do teor de ar incorporado nos diferentes níveis dos fatores.

Fatores	Níveis	Média
Cimento	1	21,443 a
	2	19,190 b
Teor de Agregado	6	22,353 a
	10	20,412 b
	14	20,112 b
	18	20,950 b
	22	17,754 c
% aditivo	1,5	19,969 a
	3,0	20,453 a
	4,5	21,026 a
	6,0	19,818 a

Análise do Efeito de interação

A Tabela 13 apresenta as médias do teor de ar incorporado para os diferentes níveis do fator cimento, fixados os níveis do fator teor de aditivo. Essas médias podem ser visualizadas na Figura 19.

TABELA 13 – Médias do teor de ar incorporado nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.

Família	% aditivo	Média
1	1,5	22,05
	3,0	21,58
	4,5	21,16
	6,0	20,96
2	1,5	17,88
	3,0	19,32
	4,5	20,88
	6,0	18,67

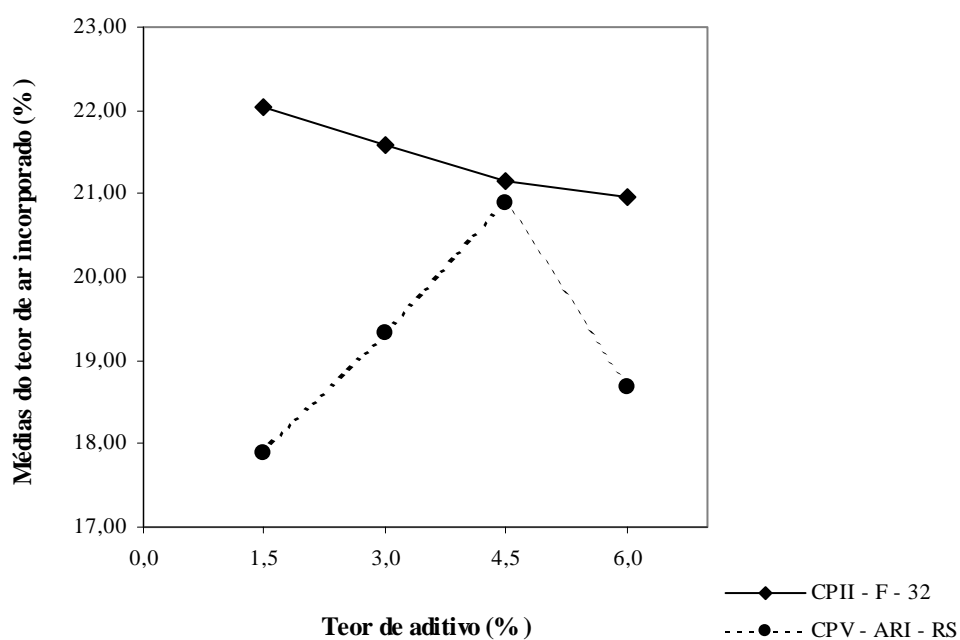


FIGURA 19 – Gráfico das médias do teor de ar incorporado nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo.

Observando a figura 19, pode-se notar que o volume de ar incorporado é maior quando utiliza-se o cimento CPII – F – 32.

Da mesma forma que as demais propriedades analisadas anteriormente, o cimento CPV – ARI – RS continuou apresentando um comportamento irregular também em relação ao teor de ar incorporado, podendo ser atribuído às já comentadas falhas de dosagem.

Analisando de maneira geral, pode-se afirmar que para obter maiores teores de ar incorporado, a melhor combinação foi o cimento CPlI – F – 32, com teor de agregado igual a 6 Kg, já que esse nível apresentou a maior média.

Quanto ao teor de aditivo, analisando estatisticamente, pôde-se constatar que o mesmo não influencia significativamente a quantidade de ar incorporado dentro da faixa de teor de agregado estudada de 6 a 22 Kg, isto é, não há diferença ao adicionar 1,5%, 3,0%, 4,5% ou 6,0% de aditivo. Portanto, conclui-se que a melhor opção é o teor de aditivo igual a 1,5%.

4.3 Resistência à compressão

A resistência à compressão (NBR 5739/94) foi avaliada somente para a idade de 28 dias.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados de resistência à compressão para as Famílias 1 e 2, respectivamente. Em seguida, apresentam-se as Figuras 20 e 21, as quais ilustram o comportamento dos traços pesquisados quanto à relação entre resistência à compressão e teor de aditivo, calculado proporcionalmente à massa do aglomerante.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 16, constatou-se que todos os efeitos principais dos fatores e as interações entre eles são significantes, já que todas as $Pr > F$ foram menores que 0,05 ($p\text{-valor} < 0,05$). Isto é, todos os fatores exercem influência sobre a resistência à compressão.

Portanto, as médias para os níveis dos fatores foram calculadas, possibilitando observar a mudança que se tem ao passar de um nível para o outro (Tabela 17).

A fim de verificar se as médias das respostas para os diferentes níveis dentro de cada fator diferem entre si, foram aplicados os testes de Tukey e de Duncan.

Os resultados dos testes coincidiram e podem ser observados na Tabela 17. As médias com letras diferentes são estatisticamente significantes ao nível de 5% de significância, ou seja, há diferença de um nível para o outro. Assim, médias com letras iguais não são significantes ao nível de 5% de significância, ou seja, não há diferença de um nível para o outro.

Portanto, foram consideradas iguais as médias dos níveis 3,0% e 6,0% do fator teor de aditivo.

A influência da interação será analisada graficamente.

TABELA 14 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPII – F - 32. Resistência à compressão.

Traço	Aditivo (%)	Resistência à Compressão (MPa)					
		Corpos de Prova				Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4		
T _{1;6;0,0}	0,0	7,35	7,52	7,78	7,78	7,61	0,21
T _{1;6;1,5}	1,5	5,19	5,41	5,58	5,62	5,45	0,20
T _{1;6;3,0}	3,0	2,92	2,96	3,02	3,07	2,99	0,07
T _{1;6;4,5}	4,5	2,81	2,94	3,13	3,13	3,00	0,16
T _{1;6;6,0}	6,0	2,59	2,81	2,81	2,83	2,76	0,11
T _{1;10;0,0}	0,0	2,72	2,81	3,03	3,03	2,90	0,16
T _{1;10;1,5}	1,5	0,97	1,08	1,08	1,08	1,05	0,06
T _{1;10;3,0}	3,0	1,30	1,32	1,32	1,34	1,32	0,02
T _{1;10;4,5}	4,5	1,08	1,12	1,19	1,19	1,15	0,05
T _{1;10;6,0}	6,0	1,10	1,15	1,17	1,19	1,15	0,04
T _{1;14;0,0}	0,0	0,83	0,84	0,86	0,86	0,85	0,02
T _{1;14;1,5}	1,5	0,65	0,71	0,76	0,76	0,72	0,05
T _{1;14;3,0}	3,0	0,54	0,54	0,56	0,58	0,56	0,02
T _{1;14;4,5}	4,5	0,50	0,54	0,61	0,65	0,58	0,07
T _{1;14;6,0}	6,0	0,63	0,65	0,69	0,71	0,67	0,04
T _{1;18;0,0}	0,0	0,56	0,56	0,58	0,61	0,58	0,02
T _{1;18;1,5}	1,5	0,35	0,37	0,37	0,39	0,37	0,02
T _{1;18;3,0}	3,0	0,35	0,40	0,40	0,41	0,39	0,03
T _{1;18;4,5}	4,5	0,39	0,41	0,43	0,43	0,42	0,02
T _{1;18;6,0}	6,0	0,41	0,43	0,43	0,45	0,43	0,02
T _{1;22;0,0}	0,0	0,43	0,43	0,48	0,50	0,46	0,04
T _{1;22;1,5}	1,5	0,28	0,28	0,30	0,30	0,29	0,01
T _{1;22;3,0}	3,0	0,26	0,30	0,32	0,35	0,31	0,04
T _{1;22;4,5}	4,5	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,00
T _{1;22;6,0}	6,0	0,21	0,24	0,26	0,28	0,25	0,03

TABELA 15 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPV – ARI - RS. Resistência à compressão.

Traço	Aditivo (%)	Resistência à Compressão (MPa)					
		Corpos de Prova				Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4		
T _{2;6;0,0}	0,0	12,11	14,92	15,14	17,51	14,92	2,21
T _{2;6;1,5}	1,5	8,22	8,65	9,08	9,51	8,87	0,56
T _{2;6;3,0}	3,0	6,49	6,92	7,14	7,35	6,98	0,37
T _{2;6;4,5}	4,5	5,20	5,40	5,45	5,30	5,34	0,11
T _{2;6;6,0}	6,0	7,14	7,35	7,35	7,35	7,30	0,10
T _{2;10;0,0}	0,0	3,46	3,89	4,32	4,97	4,16	0,64
T _{2;10;1,5}	1,5	2,16	2,38	2,81	3,46	2,70	0,57
T _{2;10;3,0}	3,0	1,17	1,19	1,21	1,23	1,20	0,03
T _{2;10;4,5}	4,5	1,05	1,05	1,10	1,10	1,08	0,03
T _{2;10;6,0}	6,0	1,51	1,51	1,62	1,62	1,57	0,06
T _{2;14;0,0}	0,0	1,30	1,40	1,51	1,73	1,49	0,18
T _{2;14;1,5}	1,5	0,81	0,79	0,78	0,79	0,79	0,01
T _{2;14;3,0}	3,0	0,81	0,79	0,78	0,79	0,79	0,01
T _{2;14;4,5}	4,5	0,40	0,43	0,49	0,54	0,47	0,06
T _{2;14;6,0}	6,0	0,80	0,80	0,82	0,82	0,81	0,01
T _{2;18;0,0}	0,0	0,67	0,71	0,76	0,84	0,75	0,07
T _{2;18;1,5}	1,5	0,41	0,42	0,43	0,43	0,42	0,01
T _{2;18;3,0}	3,0	0,35	0,39	0,41	0,43	0,40	0,03
T _{2;18;4,5}	4,5	0,35	0,36	0,37	0,41	0,37	0,03
T _{2;18;6,0}	6,0	0,43	0,43	0,45	0,45	0,44	0,01
T _{2;22;0,0}	0,0	0,38	0,39	0,41	0,43	0,40	0,02
T _{2;22;1,5}	1,5	0,22	0,24	0,24	0,26	0,24	0,02
T _{2;22;3,0}	3,0	0,28	0,29	0,30	0,32	0,30	0,02
T _{2;22;4,5}	4,5	0,19	0,20	0,22	0,22	0,21	0,02
T _{2;22;6,0}	6,0	0,24	0,26	0,26	0,26	0,26	0,01

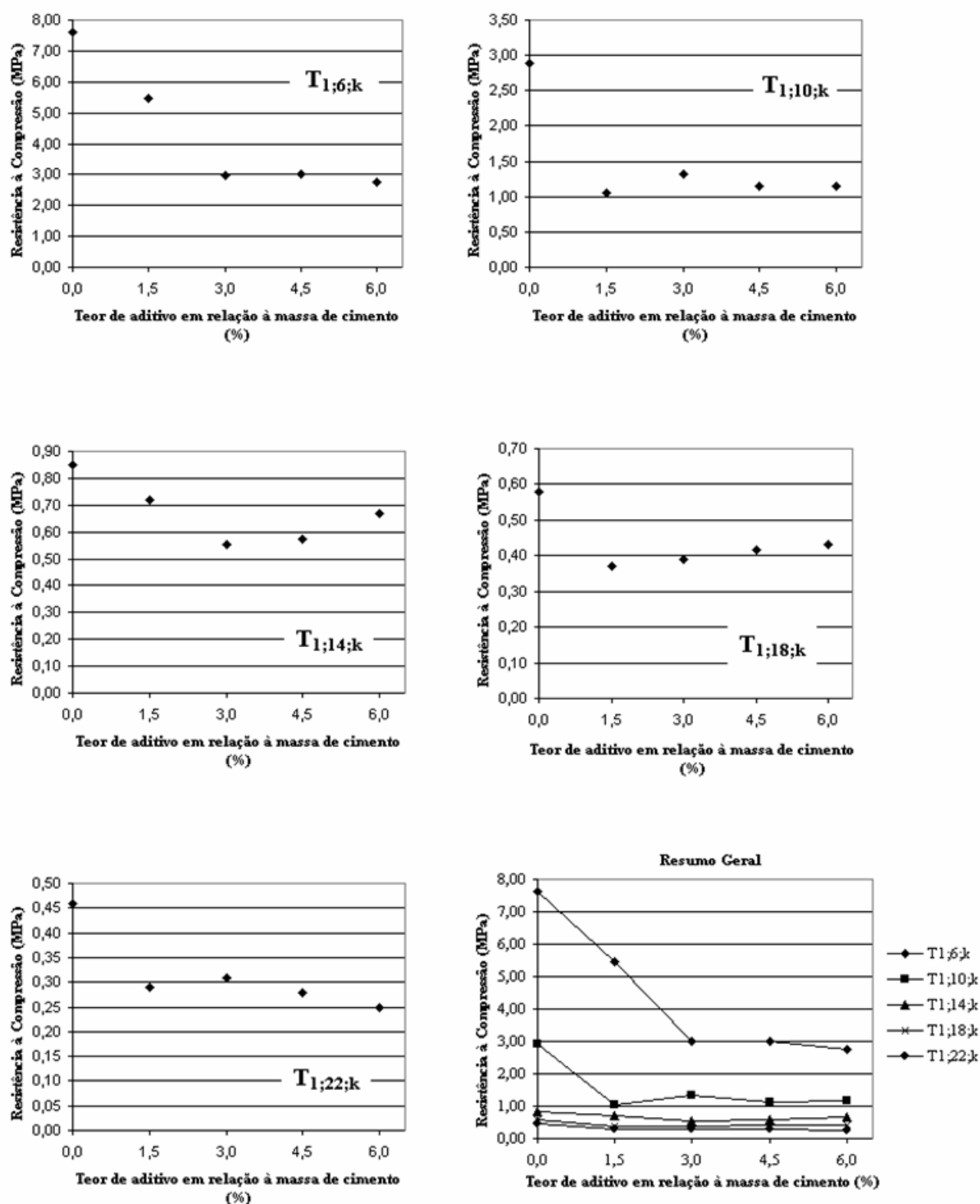


FIGURA 20 - Resistência à compressão nas argamassas confeccionadas com cimento CPII - F - 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

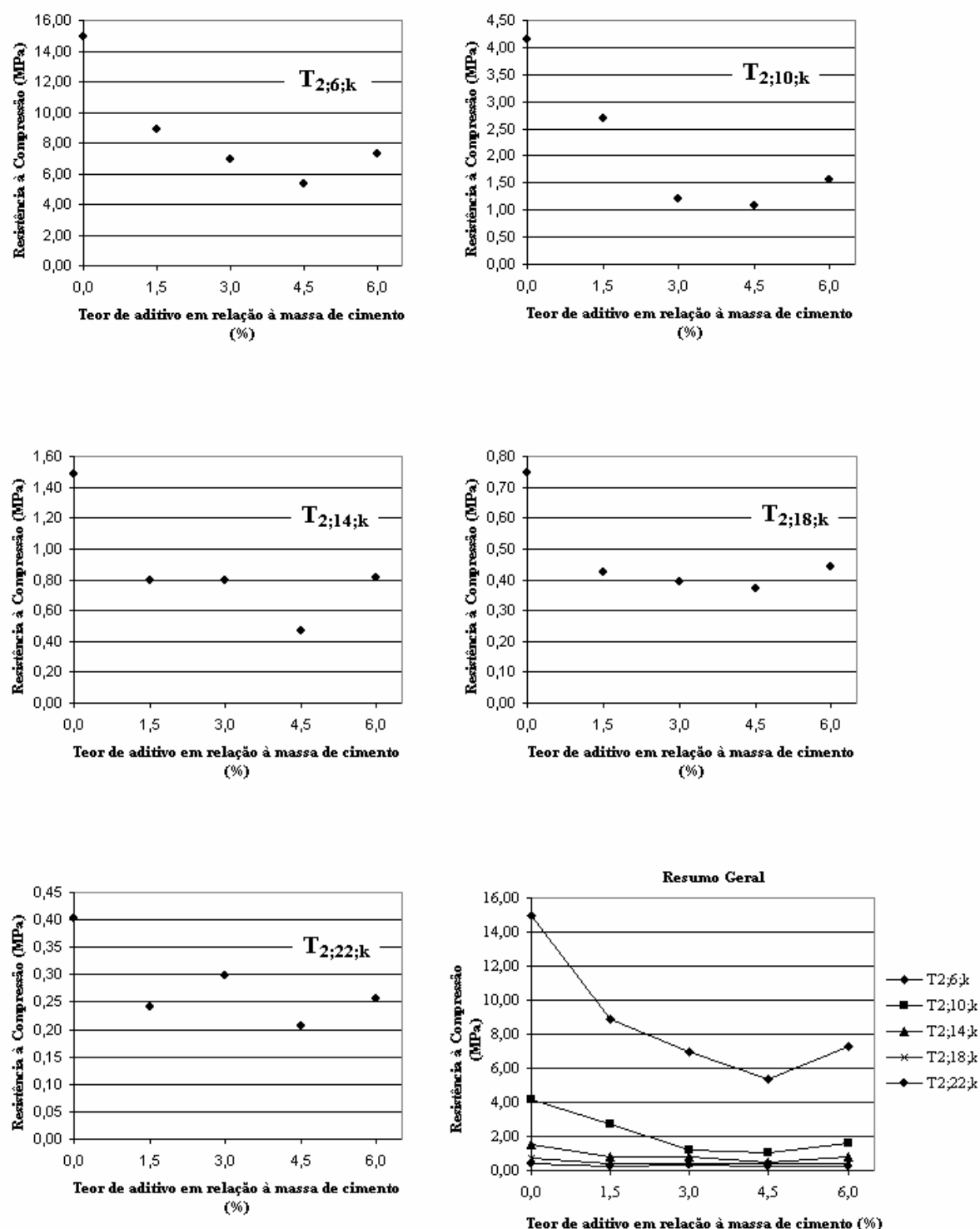


FIGURA 21 - Resistência à compressão nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

TABELA 16 – Análise da variância para a resistência à compressão.

Fonte de variação	Número de Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	Pr > F
Cimento	1	21,646	21,646	922,90	< 0,0001
% aditivo	3	22,205	7,402	315,59	< 0,0001
Teor de agregado	4	502,718	125,680	5358,57	< 0,0001
Cimento x % aditivo	3	8,876	2,959	126,15	< 0,0001
Cimento x Teor de agregado	4	50,786	12,696	541,34	< 0,0001
% aditivo x Teor de agregado	12	52,213	4,351	185,52	< 0,0001
Cimento x % aditivo x Teor de agregado	12	22,616	1,885	80,36	< 0,0001
Resíduos	120	2,814	0,023		
Total	159	683,876			

TABELA 17 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis dos fatores.

Fatores	Níveis	Média
Cimento	1	1,942 a
	2	1,206 b
Teor de Agregado	6	5,030 a
	10	1,402 b
	14	0,767 c
	18	0,404 d
	22	0,265 e
% aditivo	1,5	2,097 a
	3,0	1,592 b
	4,5	1,044 c
	6,0	1,563 b

Análise do Efeito de interação

A Tabela 18 apresenta as médias da resistência à compressão para os dois tipos de cimento, fixados os teores de aditivo. Essas médias podem ser melhor observadas na Figura 22.

TABELA 18 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.

Família	% aditivo	Média
1	1,5	1,57
	3,0	1,11
	4,5	1,08
	6,0	1,05
2	1,5	2,62
	3,0	2,07
	4,5	1,00
	6,0	2,07

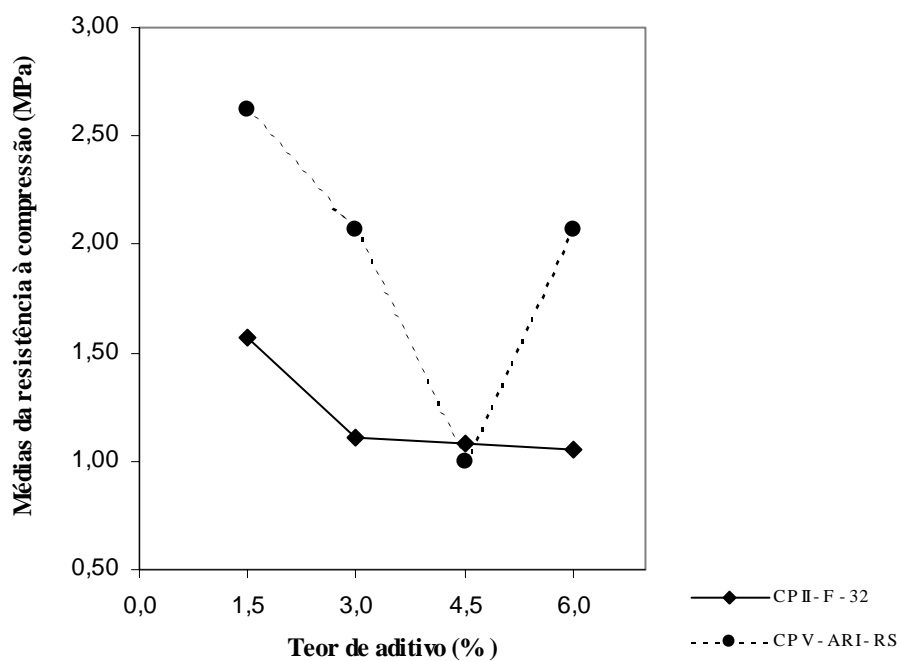


FIGURA 22 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos dois níveis do fator cimento nos quatro níveis do fator teor de aditivo.

Analisando a figura 22, pode-se afirmar que aumentando o teor de aditivo ocorreu, principalmente para o CPlI – F – 32, um declínio da resistência à compressão. Já para o cimento CPV – ARI – RS, não pode-se confirmar tal comportamento devido à presença do valor espúrio.

Pode-se observar também que, para obter maiores resistências à compressão, a melhor combinação foi o cimento CPV – ARI – RS com 1,5% de aditivo.

Além disso, nota-se que com 4,5% de aditivo, o cimento CPV – ARI – RS apresentou uma discrepância acentuada em relação aos demais pontos, o que provavelmente ocorreu em consequência de falhas operacionais na dosagem, uma vez que tal comportamento anômalo foi observado também na resistência à tração, como será abordado adiante.

A Tabela 19 apresenta as médias da resistência à compressão para os dois tipos de cimento, fixados os teores de agregado, as quais podem ser visualizadas na Figura 23.

TABELA 19 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado.

Família	Teor de agregado	Média
1	6	3,551
	10	1,167
	14	0,630
	18	0,401
	22	0,281
2	6	6,510
	10	1,635
	14	0,905
	18	0,407
	22	0,250

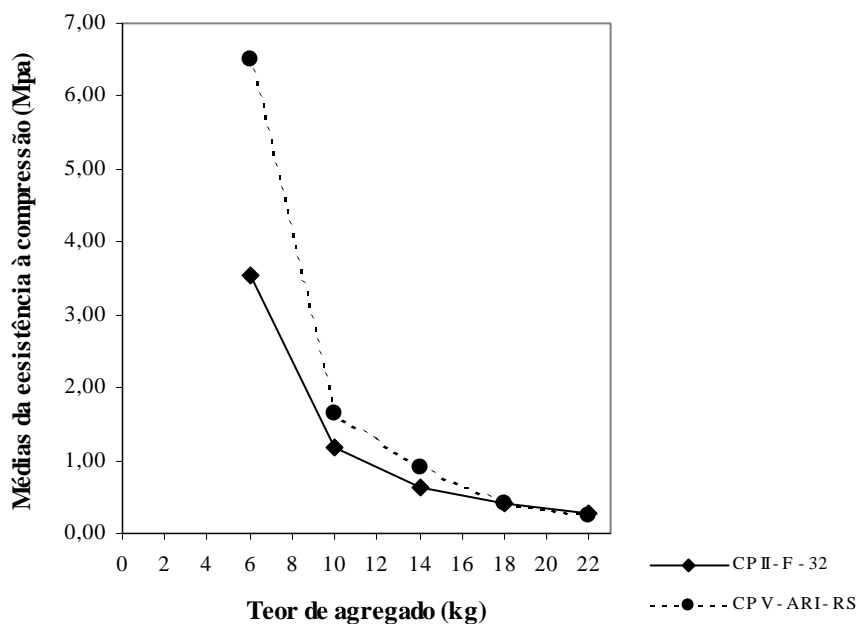


FIGURA 23 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator teor de agregado.

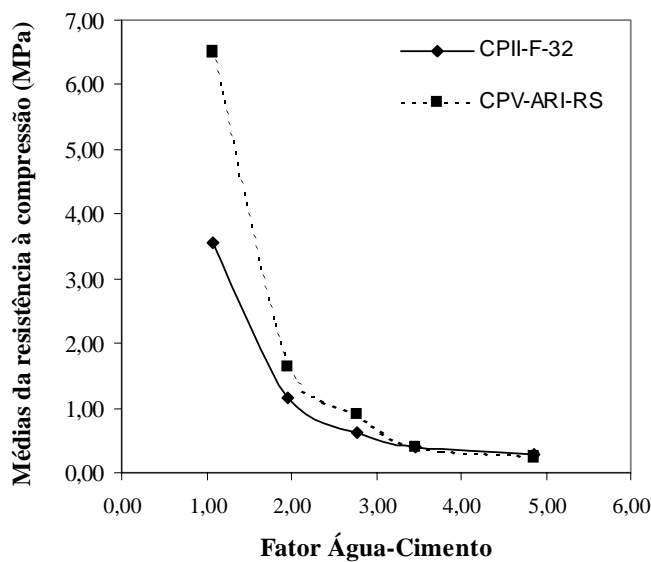


FIGURA 24 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator água-cimento.

Como era esperado, pode-se observar na figura 24 que à medida que aumentou o teor de agregado, evidenciou-se um declínio na resistência à compressão e que o melhor rendimento ocorreu com o cimento CPV – ARI – RS, com teor de agregado igual a 6 kg.

Nota-se ainda que, à medida que aumentou o teor de agregado, ocorreu uma diminuição gradativa da diferença entre as médias dos cimentos.

A Tabela 20 apresenta as médias da resistência à compressão para os diferentes teores de aditivo, fixados os níveis do teor de agregado. A Figura 25 ilustra essas médias.

TABELA 20 – Médias da variável resistência à compressão nos diferentes níveis do fator teor de aditivo para os níveis fixados do fator teor de agregado.

Aditivo	Teor de agregado	Média (*)
1,5	6	7,16
	10	1,88
	14	0,79
	18	0,39
	22	0,26
3,0	6	4,98
	10	1,26
	14	1,02
	18	0,39
	22	0,30
4,5	6	2,95
	10	1,11
	14	0,52
	18	0,39
	22	0,24
6,0	6	5,03
	10	1,36
	14	0,74
	18	0,44
	22	0,25

(*) Resultados obtidos através do programa de análise estatística SAS

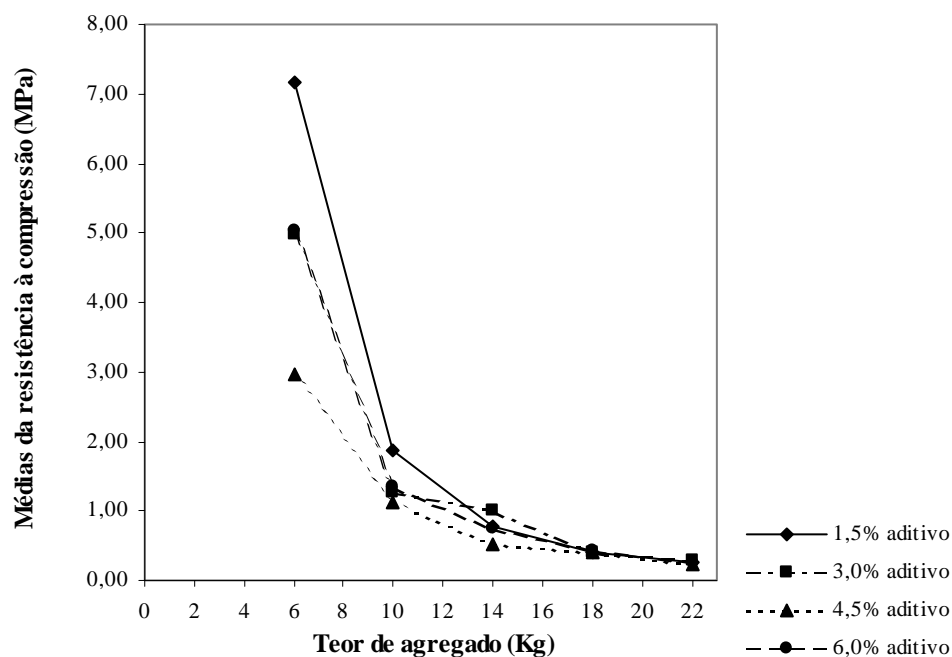


FIGURA 25 – Gráfico das médias da variável resistência à compressão nos níveis do fator teor de aditivo nos níveis do fator teor de agregado.

Analisando a figura, à medida que aumentou o teor de agregado, os teores de aditivo não influenciaram na resistência à compressão.

Nota-se ainda que para obter maiores resistências à compressão, a melhor combinação seria 1,5% de aditivo com teor de agregado igual a 6 Kg.

Além disso, observa-se que as curvas do teor de aditivo iguais a 3,0% e 6,0% se sobrepõem, o que já havia sido constatado através dos testes de Tukey e Duncan.

A Tabela 21 apresenta as médias da resistência à compressão para os dois tipos de cimento, fixados os níveis do teor de agregado e do teor de aditivo. Essas médias podem ser visualizadas na Figura 26.

TABELA 21 – Médias da resistência à compressão nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado e do fator teor de aditivo.

Cimento	Aditivo	Teor de Agregado	Médias	Cimento	Aditivo	Teor de Agregado	Médias
CP II-F-32	1,5	6	5,45	CP V-ARI-RS	1,5	6	8,86
		10	1,05			10	2,79
		14	0,72			14	0,86
		18	0,37			18	0,42
		22	0,29			22	0,24
	3,0	6	2,99		3,0	6	6,98
		10	1,32			10	1,20
		14	0,55			14	1,49
		18	0,39			18	0,39
		22	0,31			22	0,30
	4,5	6	3,00		4,5	6	2,90
		10	1,14			10	1,08
		14	0,58			14	0,47
		18	0,41			18	0,37
		22	0,28			22	0,21
	6,0	6	2,76		6,0	6	7,30
		10	1,15			10	1,56
		14	0,67			14	0,81
		18	0,43			18	0,44
		22	0,25			22	0,26

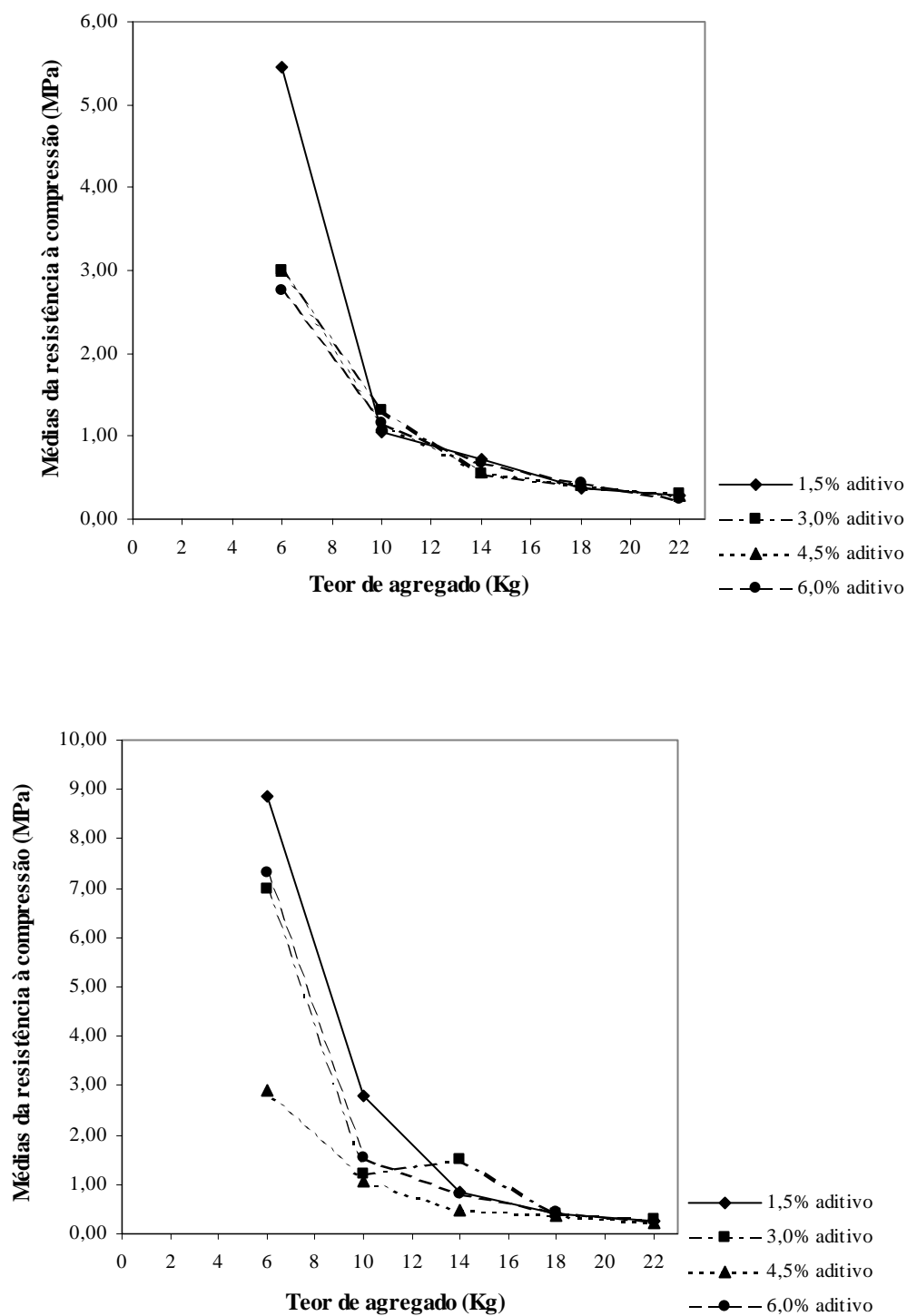


FIGURA 26 – (a) Gráfico das médias da resistência à compressão para os diferentes níveis do teor de aditivo nos níveis do teor de agregado para o cimento CII – F – 32.
 (b) Gráfico das médias da resistência à compressão para os diferentes níveis do teor de aditivo nos níveis do teor de agregado para o cimento CPV – ARI - RS.

A Figura 26 confirma que aumentando o teor de agregado há uma queda significativa na resistência à compressão, tanto para o cimento CII – F – 32 como para o CPV- ARI – RS.

Nota-se ainda que a partir de determinado teor de agregado, os resultados tendem a se agrupar.

Além disso, pode-se afirmar que o tipo de cimento influencia na resistência à compressão.

Mais uma vez, torna-se claro que o melhor rendimento ocorreu combinando o cimento CPV – ARI – RS, com teor de agregado igual a 6 Kg e teor de aditivo igual a 1,5%.

4.4 Resistência à tração

A resistência à tração (NBR 7222/94) foi avaliada somente para a idade de 28 dias.

As Tabelas 22 e 23 apresentam os resultados de resistência à tração por compressão diametral, para as Famílias 1 e 2, respectivamente. São seguidas pelas Figuras 27 e 28, que mostram a relação entre resistência à tração por compressão diametral e teor de aditivo adicionado, calculado proporcionalmente à massa do aglomerante.

Através da análise de variância apresentada na Tabela 24, constatou-se que todos os efeitos principais dos fatores e as interações entre eles são significantes, já que todas as $Pr > F$ foram menores que 0,05 ($p\text{-valor} < 0,05$). Isto é, todos os fatores exercem influência sobre a resistência à tração.

Portanto, as médias para os níveis dos fatores foram calculadas, possibilitando observar a mudança que se tem ao passar de um nível para o outro (Tabela 25).

A fim de verificar se as médias das respostas para os diferentes níveis dentro de cada fator diferem entre si, foram aplicados os testes de Tukey e de Duncan.

Os resultados dos testes coincidiram e podem ser observados na Tabela 25. As médias com letras diferentes são estatisticamente significantes ao nível de 5% de significância, ou seja, há diferença

de um nível para o outro. Assim, médias com letras iguais não são significantes ao nível de 5% de significância, ou seja, não há diferença de um nível para o outro.

Portanto, foram consideradas iguais as médias dos níveis 18 e 22 do fator teor de agregado.

A influência da interação será analisada graficamente.

TABELA 22 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CII – F – 32. Resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Aditivo (%)	Resistência à Tração por compressão diametral (MPa)					
		Corpos de Prova				Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4		
T _{1;6;0,0}	0,0	0,38	0,39	0,40	0,41	0,39	0,01
T _{1;6;1,5}	1,5	0,35	0,37	0,38	0,38	0,37	0,01
T _{1;6;3,0}	3,0	0,27	0,32	0,34	0,35	0,32	0,03
T _{1;6;4,5}	4,5	0,35	0,36	0,38	0,38	0,37	0,01
T _{1;6;6,0}	6,0	0,25	0,27	0,27	0,29	0,27	0,02
T _{1;10;0,0}	0,0	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,01
T _{1;10;1,5}	1,5	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,01
T _{1;10;3,0}	3,0	0,08	0,11	0,12	0,12	0,11	0,02
T _{1;10;4,5}	4,5	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,01
T _{1;10;6,0}	6,0	0,11	0,11	0,11	0,14	0,12	0,01
T _{1;14;0,0}	0,0	0,08	0,08	0,09	0,11	0,09	0,01
T _{1;14;1,5}	1,5	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	0,00
T _{1;14;3,0}	3,0	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05	0,01
T _{1;14;4,5}	4,5	0,07	0,08	0,09	0,09	0,08	0,01
T _{1;14;6,0}	6,0	0,05	0,06	0,08	0,08	0,07	0,01
T _{1;18;0,0}	0,0	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06	0,00
T _{1;18;1,5}	1,5	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
T _{1;18;3,0}	3,0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,00
T _{1;18;4,5}	4,5	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,01
T _{1;18;6,0}	6,0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,01
T _{1;22;0,0}	0,0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
T _{1;22;1,5}	1,5	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
T _{1;22;3,0}	3,0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,01
T _{1;22;4,5}	4,5	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,00
T _{1;22;6,0}	6,0	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,01

TABELA 23 – Resultados obtidos para as argamassas no estado endurecido, confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS. Resistência à tração por compressão diametral.

Traço	Aditivo (%)	Resistência à Tração por compressão diametral (MPa)					
		Corpos de Prova				Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4		
T _{2;6;0,0}	0,0	1,35	1,35	1,41	1,62	1,43	0,13
T _{2;6;1,5}	1,5	0,81	0,97	1,03	1,08	0,97	0,12
T _{2;6;3,0}	3,0	0,54	0,60	0,60	0,70	0,61	0,07
T _{2;6;4,5}	4,5	0,33	0,34	0,34	0,35	0,34	0,01
T _{2;6;6,0}	6,0	0,81	0,81	0,87	0,87	0,84	0,03
T _{2;10;0,0}	0,0	0,27	0,27	0,31	0,32	0,29	0,03
T _{2;10;1,5}	1,5	0,14	0,16	0,16	0,22	0,17	0,03
T _{2;10;3,0}	3,0	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,00
T _{2;10;4,5}	4,5	0,10	0,11	0,11	0,12	0,11	0,01
T _{2;10;6,0}	6,0	0,14	0,15	0,16	0,16	0,15	0,01
T _{2;14;0,0}	0,0	0,04	0,04	0,05	0,07	0,05	0,01
T _{2;14;1,5}	1,5	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,01
T _{2;14;3,0}	3,0	0,05	0,06	0,06	0,07	0,06	0,01
T _{2;14;4,5}	4,5	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,01
T _{2;14;6,0}	6,0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,00
T _{2;18;0,0}	0,0	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,00
T _{2;18;1,5}	1,5	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,00
T _{2;18;3,0}	3,0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
T _{2;18;4,5}	4,5	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04	0,00
T _{2;18;6,0}	6,0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,00
T _{2;22;0,0}	0,0	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,01
T _{2;22;1,5}	1,5	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00
T _{2;22;3,0}	3,0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
T _{2;22;4,5}	4,5	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00
T _{2;22;6,0}	6,0	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,01

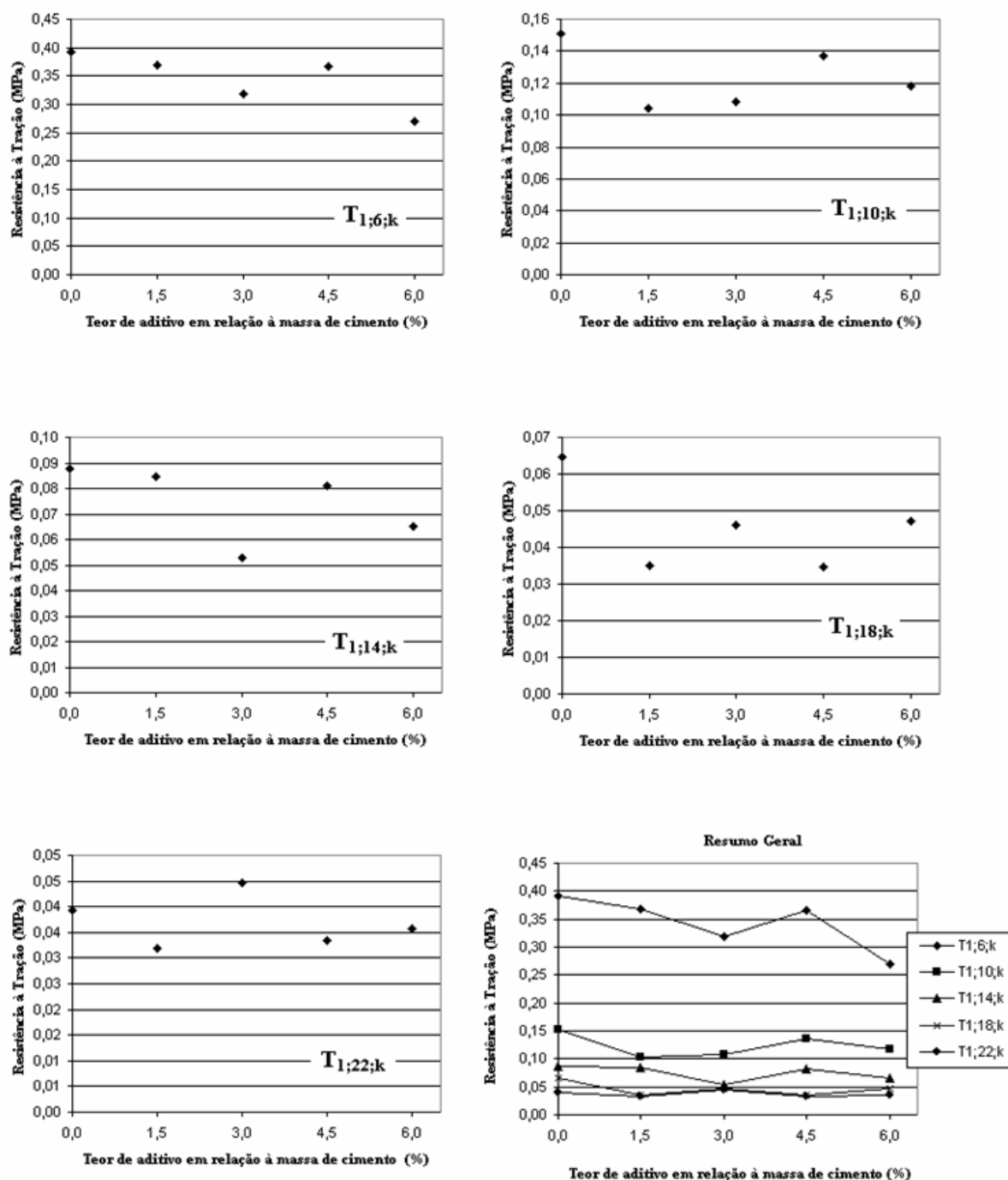


FIGURA 27 - Resistência à tração por compressão diametral nas argamassas confeccionadas com cimento CPPII - F - 32, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

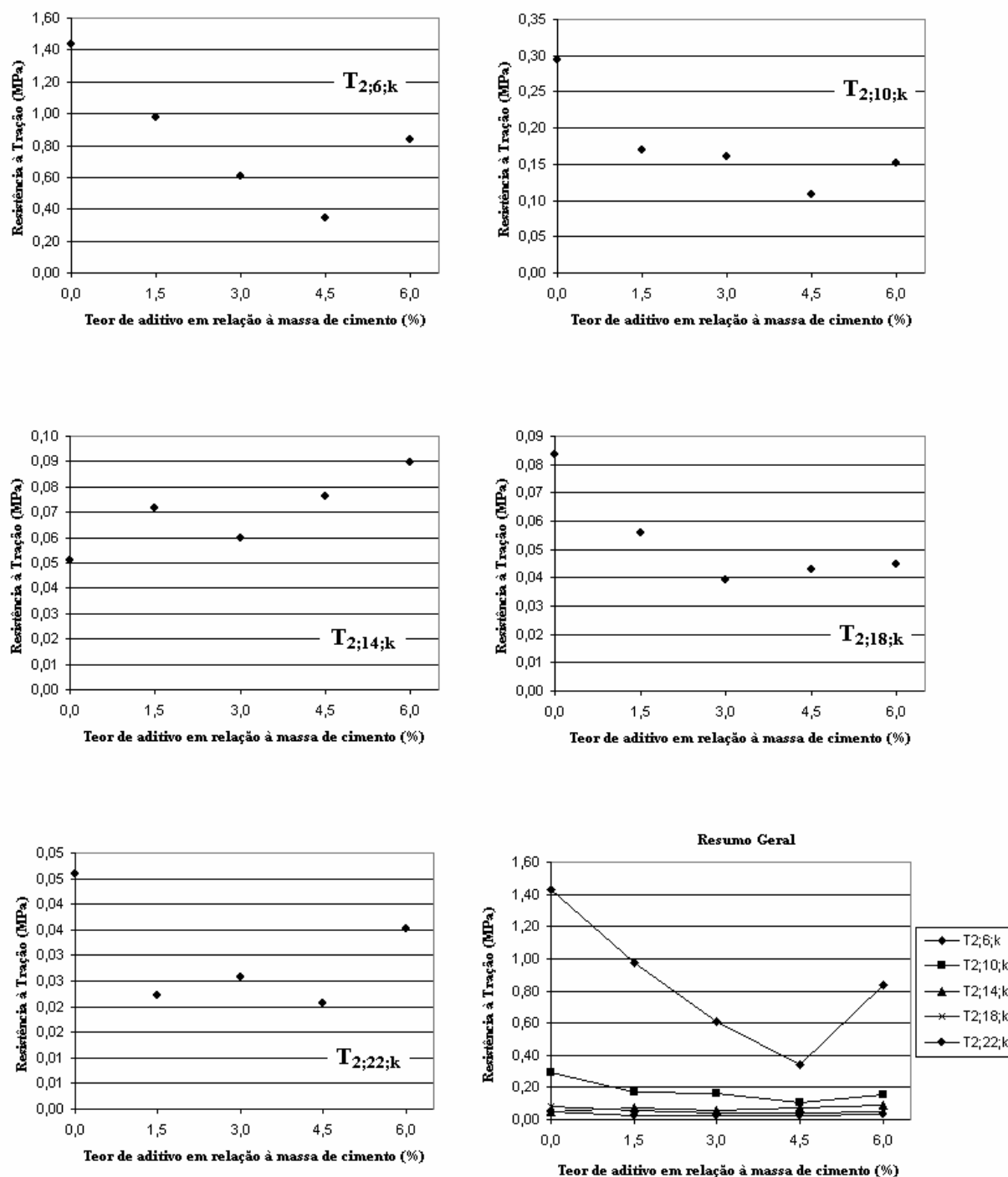


FIGURA 28 - Resistência à tração por compressão diametral nas argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS, em função do percentual de aditivo calculado em relação à massa de cimento.

Observação: A nomenclatura dos traços é representada por $T_{i;j;k}$, onde i é a família a qual pertence, ou seja, cimento CPII - F - 32 ou CPV - ARI - RS, j é o teor de agregado usado no traço e k é o teor de aditivo utilizado, calculado em relação à massa de cimento.

TABELA 24 - Análise da variância para a resistência à tração por compressão diametral.

Fonte de variação	Número de Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	Pr > F
Cimento	1	0,241	0,241	391,25	< 0,0001
% aditivo	3	0,102	0,034	55,40	< 0,0001
Teor de agregado	4	5,176	1,294	2100,41	< 0,0001
Cimento x % aditivo	3	0,140	0,047	75,84	< 0,0001
Cimento x Teor de agregado	4	0,797	0,199	323,53	< 0,0001
% aditivo x Teor de agregado	12	0,338	0,282	45,71	< 0,0001
Cimento x % aditivo x Teor de agregado	12	0,389	0,324	52,66	< 0,0001
Resíduos	120		0,001		
Total	159	683,876			

TABELA 25 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis dos fatores.

Fatores	Níveis	Média
Cimento	1	0,197 a
	2	0,119 b
Teor de Agregado	6	0,511 a
	10	0,132 b
	14	0,074 c
	18	0,043 d
	22	0,031 d
% aditivo	1,5	0,192 a
	3,0	0,170 b
	4,5	0,147 c
	6,0	0,124 d

Análise do Efeito de interação

A Tabela 26 apresenta as médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator cimento, fixados os níveis do fator teor de aditivo. Essas médias podem ser visualizadas na Figura 29.

TABELA 26 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de aditivo.

Família	% aditivo	Média
1	1,5	0,125
	3,0	0,114
	4,5	0,131
	6,0	0,107
2	1,5	0,259
	3,0	0,179
	4,5	0,117
	6,0	0,233

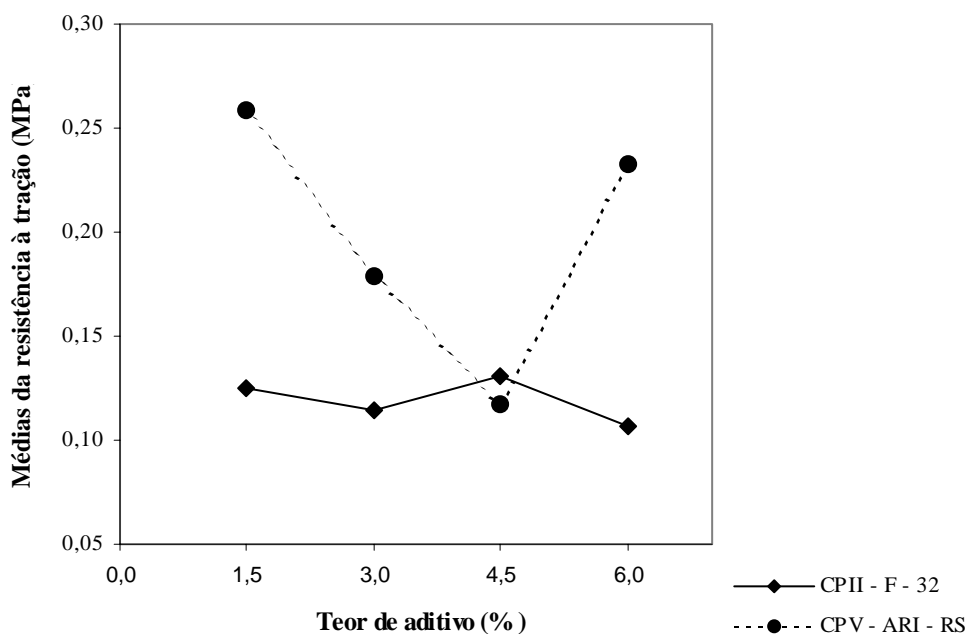


FIGURA 29 – Gráfico das médias da resistência à tração nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator teor de aditivo.

Pode-se notar que houve uma descontinuidade no comportamento da resistência à tração com o aumento do aditivo, principalmente para o cimento CPV – ARI – RS. Da mesma forma que na resistência à compressão, pode-se atribuir tais irregularidades à possíveis falhas operacionais na dosagem da mistura.

Dentro do intervalo de estudo, as maiores resistências à tração foram obtidas combinando o cimento CPV – ARI – RS com 1,5% de aditivo.

A Tabela 27 apresenta as médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator cimento, fixados os níveis do fator teor de agregado. Essas médias podem ser visualizadas na Figura 30.

TABELA 27 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor agregado.

Família	Teor de agregado	Média
1	6	0,332
	10	0,116
	14	0,073
	18	0,040
	22	0,035
2	6	0,690
	10	0,148
	14	0,075
	18	0,045
	22	0,027

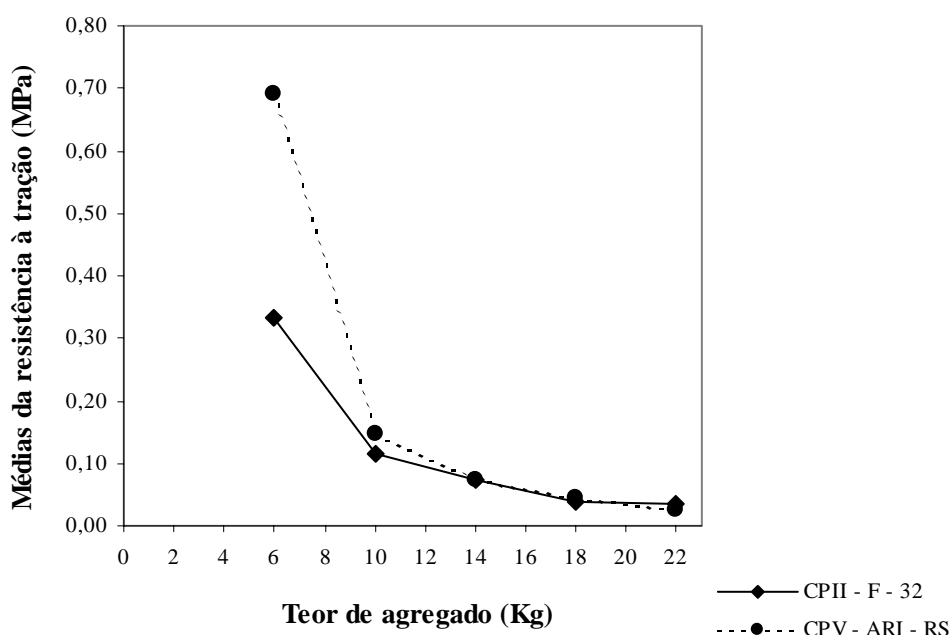


FIGURA 30 – Gráfico das médias da resistência à tração nos dois níveis do fator cimento nos cinco níveis do fator teor de agregado.

Visualiza-se na figura que, à medida que aumentou o teor de agregado, evidenciou-se um declínio na resistência à tração.

Nota-se que aumentando o teor de agregado de 6 Kg para 10 Kg, houve um declínio considerável da resistência à tração. No entanto, a partir desse ponto as reduções foram praticamente imperceptíveis, independente do tipo de cimento.

Pode-se observar que o melhor rendimento ocorreu com o cimento CPV – ARI – RS, com teor de agregado igual a 6 kg.

A Tabela 28 apresenta as médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator teor de aditivo, fixados os níveis do fator teor de agregado. A Figura 31 ilustra essas médias.

TABELA 28 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator teor de aditivo para os níveis fixados do fator teor de agregado.

Aditivo	Teor de agregado	Média
1,5	6	0,670
	10	0,137
	14	0,081
	18	0,046
	22	0,026
3,0	6	0,465
	10	0,134
	14	0,057
	18	0,042
	22	0,036
4,5	6	0,353
	10	0,125
	14	0,078
	18	0,038
	22	0,026
6,0	6	0,555
	10	0,135
	14	0,078
	18	0,045
	22	0,036

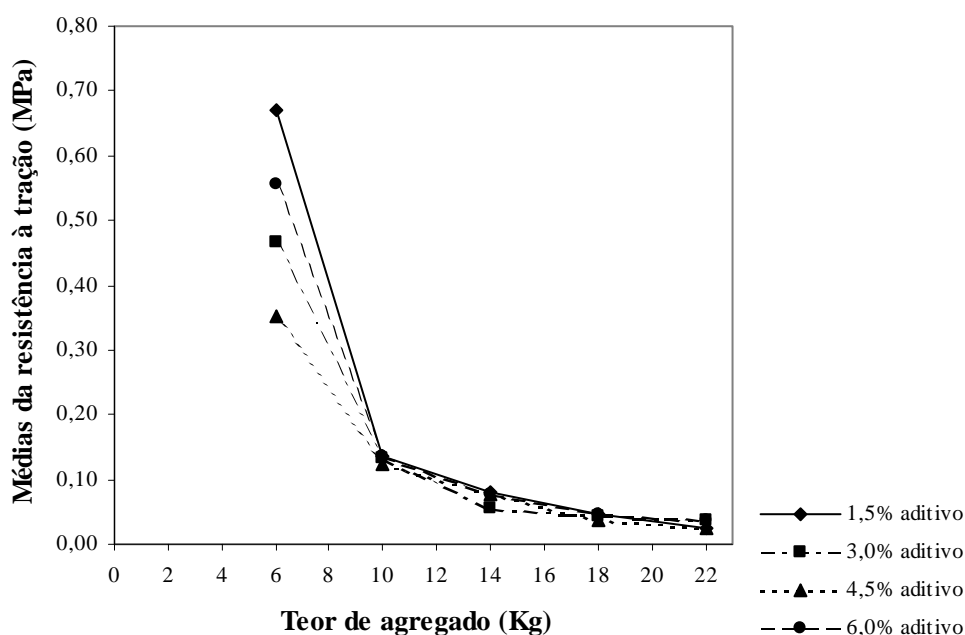


FIGURA 31 – Gráfico das médias da resistência à tração nos quatro níveis do fator teor de aditivo nos cinco níveis do fator teor de agregado.

Analisando a figura, à medida que aumentou o teor de agregado, os teores de aditivo não influenciaram na resistência à tração.

Nota-se ainda que para obter maiores resistências à tração, a melhor combinação seria 1,5% de aditivo com teor de agregado igual a 6 Kg.

A Tabela 29 apresenta as médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator cimento, fixados os níveis do fator teor de agregado e do fator teor de aditivo. Essas médias podem ser visualizadas na Figura 32.

TABELA 29 – Médias da resistência à tração nos diferentes níveis do fator cimento para os níveis fixados do fator teor de agregado e do fator teor de aditivo.

Cimento	Aditivo	Teor de Agregado	Médias	Cimento	Aditivo	Teor de Agregado	Médias
CPII-F-32	1,5	6	0,370	CPV-ARI-RS	1,5	6	0,972
		10	0,102			10	0,170
		14	0,087			14	0,075
		18	0,037			18	0,055
		22	0,030			22	0,022
	3,0	6	0,320		3,0	6	0,610
		10	0,107			10	0,160
		14	0,055			14	0,060
		18	0,045			18	0,040
		22	0,045			22	0,027
	4,5	6	0,367		4,5	6	0,340
		10	0,140			10	0,110
		14	0,082			14	0,075
		18	0,035			18	0,042
		22	0,033			22	0,020
	6,0	6	0,270		6,0	6	0,840
		10	0,117			10	0,152
		14	0,067			14	0,090
		18	0,045			18	0,045
		22	0,035			22	0,037

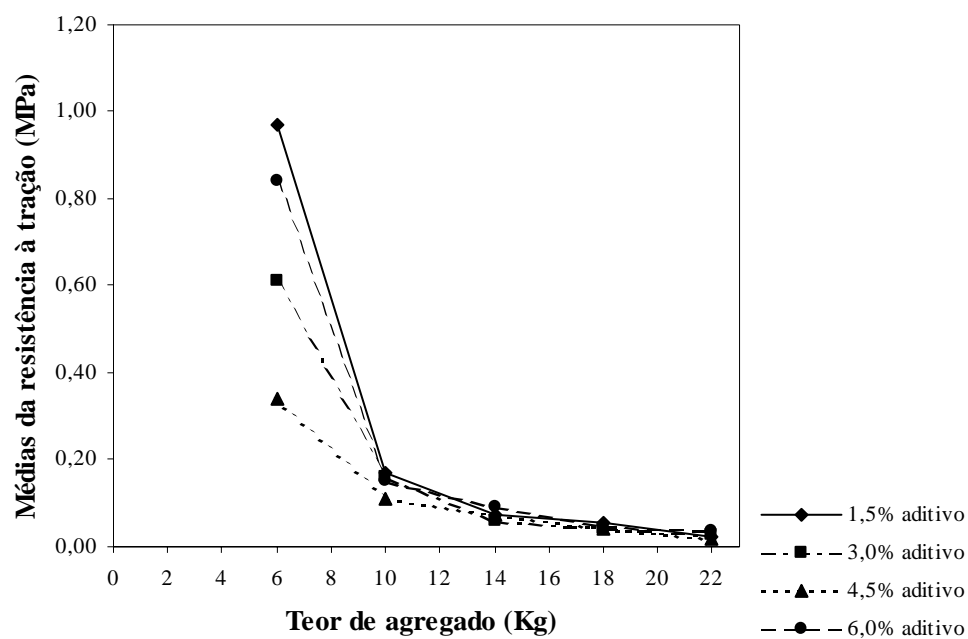
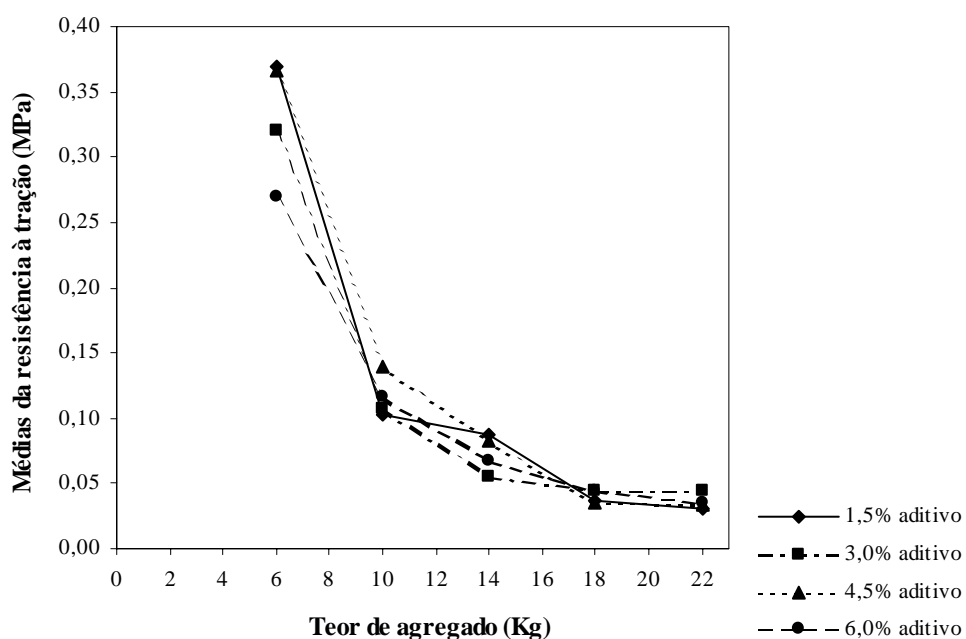


FIGURA 32 – (a) Gráfico das médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator teor de aditivo nos níveis do fator teor agregado para o cimento CPII – F – 32.
(b) Gráfico das médias da resistência à tração para os diferentes níveis do fator teor de aditivo nos níveis do fator teor de agregado para o cimento CPV – ARI – RS.

A Figura 32 confirma que aumentando o teor de agregado há uma queda significativa na resistência à compressão, tanto para o cimento CII – F – 32 como para o CPV- ARI – RS.

Nota-se ainda que a partir de determinado teor de agregado, os resultados tendem a se agrupar.

Além disso, pode-se afirmar que o tipo de cimento influencia na resistência à compressão.

Mais uma vez, torna-se claro que o melhor rendimento ocorreu combinando o cimento CPV – ARI – RS, com teor de agregado igual a 6 Kg e teor de aditivo igual a 1,5%.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Com os resultados obtidos, pode-se evidenciar a influência do aditivo incorporador de ar na melhoria da trabalhabilidade das argamassas pesquisadas, pois fazendo-se uma análise comparativa entre as argamassas que receberam incremento de aditivo e as argamassas sem aditivo, notou-se um aumento bastante significativo do abatimento do tronco de cone.

Essa modificação resultou em alterações que foram sentidas ao manuseio. As argamassas ficaram mais leves, mais coesas, menos ásperas e mais trabalháveis.

Entretanto, analisando a influência do teor de aditivo na consistência das argamassas através do comparativo de médias, pode-se concluir que o aumento do teor de aditivo não influenciou o abatimento do tronco de cone, ou seja, maiores incrementos de aditivo não implicaram em maiores abatimentos nas argamassas pesquisadas.

Pode-se inferir que para os tipos de cimento estudados também não houve variação significativa do abatimento, isto é, as argamassas confeccionadas com os cimentos CPII – F – 32 e CPV – ARI – RS apresentaram abatimentos equivalentes.

Pelo comparativo de médias pode-se comprovar que as variações do teor de agregado provocaram interferência no abatimento das argamassas. Neste caso, o aumento do teor de agregado provocou a redução da consistência.

A trabalhabilidade medida pelo abatimento do tronco de cone em pesquisas com argamassas fluidas não é procedimento adequado. Fica evidenciada a necessidade de desenvolvimento de metodologia para avaliação deste tipo de argamassa no estado fresco, baseado no conceito moderno de reologia.

Sob o aspecto da incorporação de ar, analisando comparativamente as argamassas que receberam doses de aditivo e as que não receberam, notou-se que com a inclusão de aditivo houve um grande acréscimo na quantidade de ar incorporado.

No entanto, examinando o comparativo de médias, observou-se que aumentos das doses de aditivo não provocaram diferenças significativas na quantidade de ar incorporado.

Pôde-se observar, com base no comparativo de médias, que as argamassas confeccionadas com o cimento CII – F – 32 apresentaram teor de ar incorporado superior às argamassas confeccionadas com o cimento CPV – ARI – RS, confirmando a afirmação de BAUER (1985), que cimentos mais finos incorporam um volume menor de ar.

Os resultados obtidos indicaram que maiores teores de agregado reduzem a incorporação de ar nas argamassas.

Em relação à resistência à compressão, considerando as limitações desta pesquisa, pode-se afirmar, tanto para as argamassas confeccionadas com cimento CII – F – 32 quanto para as confeccionadas com CPV – ARI – RS, que após a inclusão do aditivo houve decréscimo considerável da resistência à compressão.

Embora fosse de se esperar que o aumento do teor de aditivo causasse redução da resistência à compressão, tal fato foi observado apenas para as argamassas confeccionadas com teor de agregado igual a 6 Kg, uma vez que estas apresentaram maior incorporação de ar que as argamassas confeccionadas com teores de agregado superiores. Para as demais, a resistência à compressão não sofreu perdas significativas.

Analisando a influência do tipo de cimento na resistência à compressão, pode-se comprovar que as argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS apresentaram resistências à compressão superiores às argamassas confeccionadas com cimento CII – F – 32, como era de se prever.

Quanto à resistência à compressão apresentada pelas argamassas pesquisadas, o melhor desempenho ocorreu quando utilizou-se teor de agregado igual a 6 Kg, com 1,5% de aditivo e cimento CPV – ARI – RS.

Em relação à resistência à tração, as argamassas pesquisadas apresentaram comportamento diferente do esperado, como ocorreu na resistência à compressão.

Seria normal supor uma diminuição da resistência à tração com o aumento do teor de aditivo. Entretanto, tal situação ocorreu apenas com a argamassa confeccionada com cimento CPV – ARI – RS e teor de agregado igual a 6 Kg.

As demais argamassas confeccionadas com cimento CPV – ARI – RS não sofreram perdas significativas da resistência à tração com o aumento do teor de aditivo.

Já para as argamassas confeccionadas com o cimento CII – F – 32, o comportamento da resistência à tração mostrou-se irregular com o crescimento do teor de aditivo, não permitindo uma análise conclusiva, talvez influenciada pela sensibilidade dos equipamentos.

Como pôde-se observar, os resultados de resistência à tração foram muito baixos. Assim, vale ressaltar que o equipamento de medição utilizado não foi condizente em sua precisão para as baixas leituras.

Na prática usual do concreto, costuma-se estabelecer como parâmetro, uma resistência à tração igual a 10% do valor da resistência à compressão. Segundo AITCIN (2000) esta relação aplica-se muito bem para concretos e argamassas. Na presente pesquisa, pôde-se concluir que esta relação também foi válida para as argamassas fluidas pesquisadas.

Deve-se entretanto, considerar a condição quase ideal de laboratório, onde todas as argamassas foram dosadas em peso, com procedimento de preparo pré-estabelecido e com cura úmida dos corpos de prova. Estas condições dificilmente seriam reproduzidas em uma obra, o que justifica a imposição de um coeficiente de segurança para condições de execução específicas.

Por se tratar de um produto novo, as argamassas fluidas ainda não possuem normativa específica. Assim, esta pesquisa utilizou-se tanto de normas regulamentadas para concreto quanto de normas regulamentadas para argamassa.

5.2 Recomendações para futuras pesquisas

Para um maior conhecimento da influência do teor de aditivo incorporador de ar nas propriedades das argamassas fluidas, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Avaliação de outras propriedades: permeabilidade, retração, absorção, retenção de água, retenção de consistência;
- Estudo com traços utilizando teores de agregado inferiores a 6 Kg;
- Investigação e adequação de métodos de ensaio que avaliem o escoamento da argamassa fluida;
- Relacionar a resistência à compressão com o Índice de Suporte Califórnia (CBR).
- Comparativo entre argamassas com diferentes aditivos incorporadores de ar;
- Comparativo entre argamassas, com e sem aditivo, frente às condições de exposição ao meio ambiente;
- Teores menores de aditivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITCIN, P. C. Produzindo concreto de alto desempenho com ar incorporado. Concreto de alto desempenho-PINI, Cap.9.7, pp. 316-318, 2000.
- BENINGFIELD, N. Air entrainment of mortar. 8 the Internacional Brick/Block Masonry. Ireland,UK, 1988.
- BAUER, L. A. FALCÃO. Materiais de Construção. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. pp.104 à 150, 1985.
- BAUER, L. A. FALCÃO. Materiais de Construção. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro. 5ª Edição. 1995.
- BOYNTON, R. S.; GUTSCHICK, K. A. Aderência de argamassas a elementos de alvenaria: fatores que influenciam a resistência, extensão e durabilidade da aderência. Tradução IPT – ABCP. Masonry Mortar Technical. Note3, 1964, National Lime Association.
- BUTALIA, T.S. et al. Evaluation of a dry FGD material as a flowable fill. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University. Korea Highway Corporation. Coreia do Sul. 2000.
- CALHAU, EDUARDO L. Argamassas de revestimento com aditivo incorporador de ar: Propriedades e Recomendações. Vitória, Universidade Federal do Espírito Santo, 2000. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
- CÁNOVAS, MANUEL F. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo. Pini, 1988.
- CARASEK, H. Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. São

Paulo, EPUSP, 1996. Tese apresentada à Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

CINCOTTO, M.A. et al. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. Boletim 68 IPT. São Paulo. pp.118, 1995.

COLLEPARDI, MARIO. Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo. Milano, Italy. Ulrico Hoepli Editore S.p.A., 1980.

DU, L. et al. Effects of Constituent Materials and Quantities on Water Demand and Compressive Strength of Controlled Low-Strength Material. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, Nº 6. 2002. pp. 485-495.

FISHMAN, S.R. Fill... Easier, Faster and Economical. Site: www.t2.unh.edu/spring00/pg4.html. Acesso em: 01/03/2005.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1993.

KATZ, A.; KOVLER, K. Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM). Israel Institute of Technology. Israel. 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo. Pini, 1994.

MISSISSIPPI CONCRETE INDUSTRIES ASSOCIATION. Site: www.mississippiconcrete.com/flowable_fill.cfm. Acesso em: 01/03/2005.

MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1991.

NEVILLE, ADAM MATTHEW. Propriedades do concreto. São Paulo. Pini, 1982.

- OTTO BAUMGART INDÚSTRIA E COMÉRCIO S/A. Aditivos para concretos, argamassa e caldas de cimento. São Paulo. 9ª Edição [s.l.:s.n.], 1993.
- PINTO, J.A. NASCIMENTO. Elementos para a dosagem de argamassas. Santa Maria. Edições UFSM, 1986.
- SAS / STAT User's Guide, Version 8, Cary, NC, USA: SAS Institute Inc., 2002.
- SCANDIUZZI, L.; ANDRIOLO, F. R. Concreto e seus materiais: propriedades e ensaios. São Paulo. Pini, 1986.
- SELMO, S.M.S. Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimentos externos de fachada de edifícios. Dissertação de Mestrado em C.Civil-Escola Politécnica da USP. São Paulo. 1989.
- STANDARD SPECIFICATION FOR ROAD AND BRIDGES CONSTRUCTION. Documento revisado em 30/08/2002, subseções 207.03, 207.66 e 919.22.
- TRISTÃO, F. A. Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Florianópolis. UFSC. 1995.
- YAZIGI, W. A técnica de edificar. São Paulo. 2ª Edição. Pini: SINDUSCON – SP, 1999.
- ABNT Determinação da massa unitária - AGREGADO EM ESTADO SOLTO, NBR-7251. Rio de Janeiro, 1982.
- ABNT Determinação do teor de materiais pulverulentos - AGREGADOS, NBR-7219. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT Determinação da composição granulométrica - AGREGADOS, NBR-7217. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT Determinação da massa específica de agregados miúdos - AGREGADOS, NBR-9776. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT Determinação da densidade de massa aparente no estado plástico – ARGAMASSA PARA ASSENTAMENTO DE PAREDES E REVESTIMENTO DE PAREDES E TETOS, NBR-13278. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT Determinação da massa específica- Método de ensaio – CIMENTO PORTLAND E OUTROS MATERIAIS EM PÓ, NBR-6474. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT Determinação da finura por meio da peneira 75 mm (nº 200) – CIMENTO PORTLAND, NBR-11579. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT Determinação dos tempos de pega – CIMENTO PORTLAND, NBR 11581. Rio de Janeiro 1991.

ABNT Determinação da resistência à compressão – CIMENTO PORTLAND, NBR 7215. Rio de Janeiro 1996.

ABNT Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis (Método de ensaio) - AGREGADOS, NBR 7218. Rio de Janeiro 1987.

ABNT Determinação de impurezas orgânicas húmicas em agregados miúdos (Método de ensaio) - AGREGADOS, NBR 7220. Rio de Janeiro 1987.

ABNT Ensaios de Uniformidade - ADITIVOS PARA ARGAMASSA E CONCRETOS, NBR 10908. Rio de Janeiro 1990.

ABNT Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone- CONCRETO, NBR 7223. Rio de Janeiro 1982.

ABNT Determinação do tempo de pega por meio da resistência à penetração - Concreto e argamassa – CONCRETO E ARGAMASSA, NBR 9832. Rio de Janeiro 1992.

ABNT Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – CONCRETO, NBR 5739. Rio de Janeiro 1994.

ABNT Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos - ARGAMASSA E CONCRETO, NBR 7222. Rio de Janeiro 1994.

ASTM Standard Specification for masonry cement, C-91. 1998.

BSI Specification of air-entraining (plasticizing) admixtures, BSI 4887. London, 1986.

NM Aditivos para argamassa e concreto- Ensaios de uniformidade, NM 34/94. 1994,

MR Tendency of water separate from mortars (bleeding) MR-6. France, 1982.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO PREPARO DAS ARGAMASSAS

TABELA A1 - Resultados dos ensaios de caracterização do cimento CII - F - 32.

Ensaios Químicos *	Óxido de magnésio (MgO)	5,19%
	Oxido de alumínio (Al_2O_3)	4,30%
	Oxido de silício (SiO_2)	18,17%
	Anidrido sulfúrico (SO_3)	2,86%
	Óxido de cálcio (CaO)	59,57%
	Oxido de ferro (Fe_2O_3)	2,47%
	Óxido de cálcio livre (CaO livre)	1,37%
	Resíduo insolúvel (R.I.)	1,23%
	Perda ao fogo (P.F.)	5,45%
Ensaios Físicos	Superfície específica Blaine	3,290 cm ² /g
	Resíduo na malha 200 Mesh	2,82%
	Resíduo na malha 325 Mesh	13,24%
	Início de pega	169 minutos
	Fim de pega	227 minutos
	Água de consistência normal	26,80%
	Resistência à compressão - 1 dia	14,8 MPa
	Resistência à compressão - 3 dias	24,4 MPa
	Resistência à compressão - 7 dias	28,9 MPa
	Resistência à compressão - 28 dias	37,1 MPa

* Os ensaios químicos foram realizados no laboratório da companhia de cimento.

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO
PREPARO DAS ARGAMASSAS

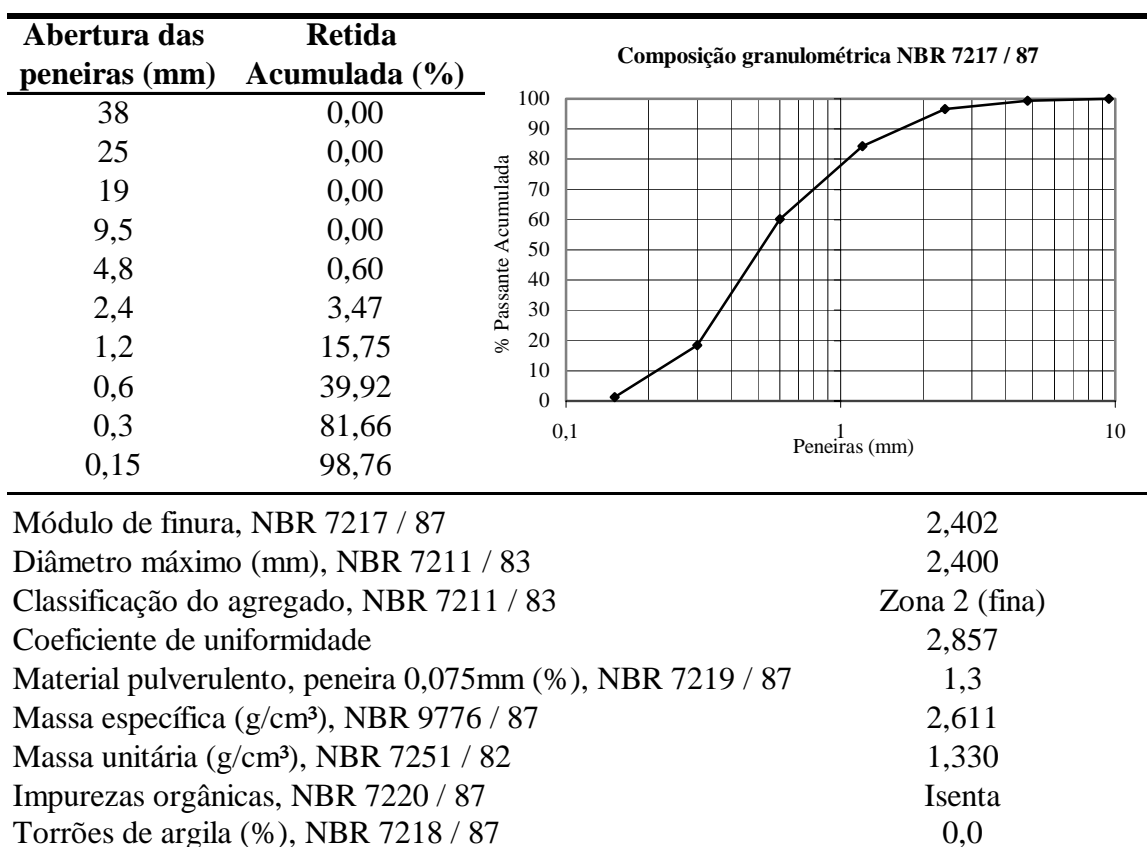
TABELA A2 - Resultados dos ensaios de caracterização do cimento CPV - ARI - RS.

Ensaios Químicos	Óxido de magnésio (MgO)	5,81%
	Oxido de alumínio (Al_2O_3)	6,27%
	Oxido de silício (SiO_2)	21,16%
	Anidrido sulfúrico (SO_3)	3,16%
	Óxido de cálcio (CaO)	52,37%
	Oxido de ferro (Fe_2O_3)	3,03%
	Óxido de cálcio livre (CaO livre)	1,32%
	Resíduo insolúvel (R.I.)	10,52%
	Perda ao fogo (P.F.)	3,76%
Ensaios Físicos	Superfície específica Blaine	4,524 cm^2/g
	Resíduo na malha 200 Mesh	0,15%
	Resíduo na malha 325 Mesh	1,76%
	Início de pega	153 minutos
	Fim de pega	214 minutos
	Água de consistência normal	29,30%
	Resistência à compressão - 1dia	20,7 MPa
	Resistência à compressão - 3dia	32,8 MPa
	Resistência à compressão - 7dia	38,2 MPa
	Resistência à compressão - 28dias	47,2 MPa

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO
PREPARO DAS ARGAMASSAS

TABELA A3 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.



Módulo de finura, NBR 7217 / 87	2,402
Diâmetro máximo (mm), NBR 7211 / 83	2,400
Classificação do agregado, NBR 7211 / 83	Zona 2 (fina)
Coefficiente de uniformidade	2,857
Material pulverulento, peneira 0,075mm (%), NBR 7219 / 87	1,3
Massa específica (g/cm³), NBR 9776 / 87	2,611
Massa unitária (g/cm³), NBR 7251 / 82	1,330
Impurezas orgânicas, NBR 7220 / 87	Isenta
Torrões de argila (%), NBR 7218 / 87	0,0

ANEXO A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS NO PREPARO DAS ARGAMASSAS

TABELA A 4 - Resultados dos ensaios de caracterização do aditivo
incorporador de ar.

Características	Natureza	líquido
	Densidade	$1,005 \pm 0,005 \text{ kg/dm}^3$
	Cor	amarelo claro
	pH	7 ± 1
	Conteúdo de íons Cl^-	$\leq 0,1\%$
	Teor de sólidos	$3,5\% \pm 0,2\%$

ANEXO B

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO

SOLOTEST® **APARELHOS PARA MECÂNICA DO SOLO LTDA**

Certificado de Calibração de Anel Dinamométrico Nº 3583-02 **Página 01 de 02**

1 - CLIENTE:
 Empresa: *CONTROLNORT ENGENHARIA DE CONTROLE LTDA.*

2 - ITEM A SER CALIBRADO:
 Item Calibrado: *Anel Dinamométrico "C"*
 Fabricante: *Solotest*
 Tipo: *Com relógio comparador analógico*
 Capacidade nominal: *4.000 kgf*
 Temperatura: *21°C*

Data: *06/05/02*
 Série: *163*
 Referência: *1.011.400*
 Umidade: *74%*

3 - RELÓGIO COMPARADOR:
 Marca do relógio comparador: *MITUTOYO*
 Tipo do relógio comparador: *0 - 5 mm subdivisão de 0,001 mm*
 N° de série: *692773*
 Procedimento interno: *PR.05.6.030*

3 - PADRÃO UTILIZADO:

Tipo	Capacidade	Número	Certificado	Laborat.	Data
<i>Célula de Carga</i>	<i>5000 kgf</i>	<i>84875</i>	<i>RF 09001</i>	<i>ITM</i>	<i>30/03/01</i>

5 - RESULTADOS OBTIDOS:

Carga Aplicada em (N)	Carga Aplicada em (kgf)	L1	L2	L3	L - Média	Div/kgf	Repetibilidade (%)	Incerteza (±) %
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
4900,00	500,00	300,00	300,50	300,00	300,17	0,6	0,17	4,53
7350,00	750,00	450,00	450,00	450,00	450,00	0,6	0,00	3,03
9800,00	1000,00	603,00	602,50	603,00	602,83	0,6	0,08	2,27
12250,00	1250,00	757,00	757,00	757,00	757,00	0,61	0,00	1,81
14700,00	1500,00	909,00	908,50	909,00	908,83	0,61	0,06	1,52
19600,00	2000,00	1211,00	1211,00	1211,00	1211,00	0,61	0,00	1,14
24500,00	2500,00	1524,00	1524,00	1524,50	1524,17	0,61	0,03	0,91
29400,00	3000,00	1831,00	1831,50	1831,00	1831,17	0,61	0,03	0,76
34300,00	3500,00	2145,00	2144,00	2144,50	2144,50	0,61	0,05	0,64
39200,00	4000,00	2455,00	2455,00	2455,00	2455,00	0,61	0,00	0,56

NOTA:

- Relógio posicionado em 0,000 mm para início de operação.
- Norma de referência: NBR 6674.
- Constante média do anel (Marshall): **1.641,41 kgf/mm**
- Para uso em CBR, a constante é: **84,95 kgf/mm . cm . cm**
- L = Leitura no relógio comparador.

- Foram executados três medições em cada um dos dez pontos da escala. - Os resultados deste certificado são válidos exclusivamente para o instrumento calibrado descrito, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares. - A sua reprodução total ou parcial dependerá de prévia autorização formal da Solotest. - A incerteza de medição declarada refere-se a um nível de confiança de aproximadamente 95%, de acordo com ISO TAG 4 de 1995.

São Paulo, 07 de maio de 2002.

Engº Rodrigo Maluf Barella, M.Sc.
 Gerente Técnico

José Divino Lima
 Departamento da Qualidade

ANEXO B

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO ANEL DINAMOMÉTRICO

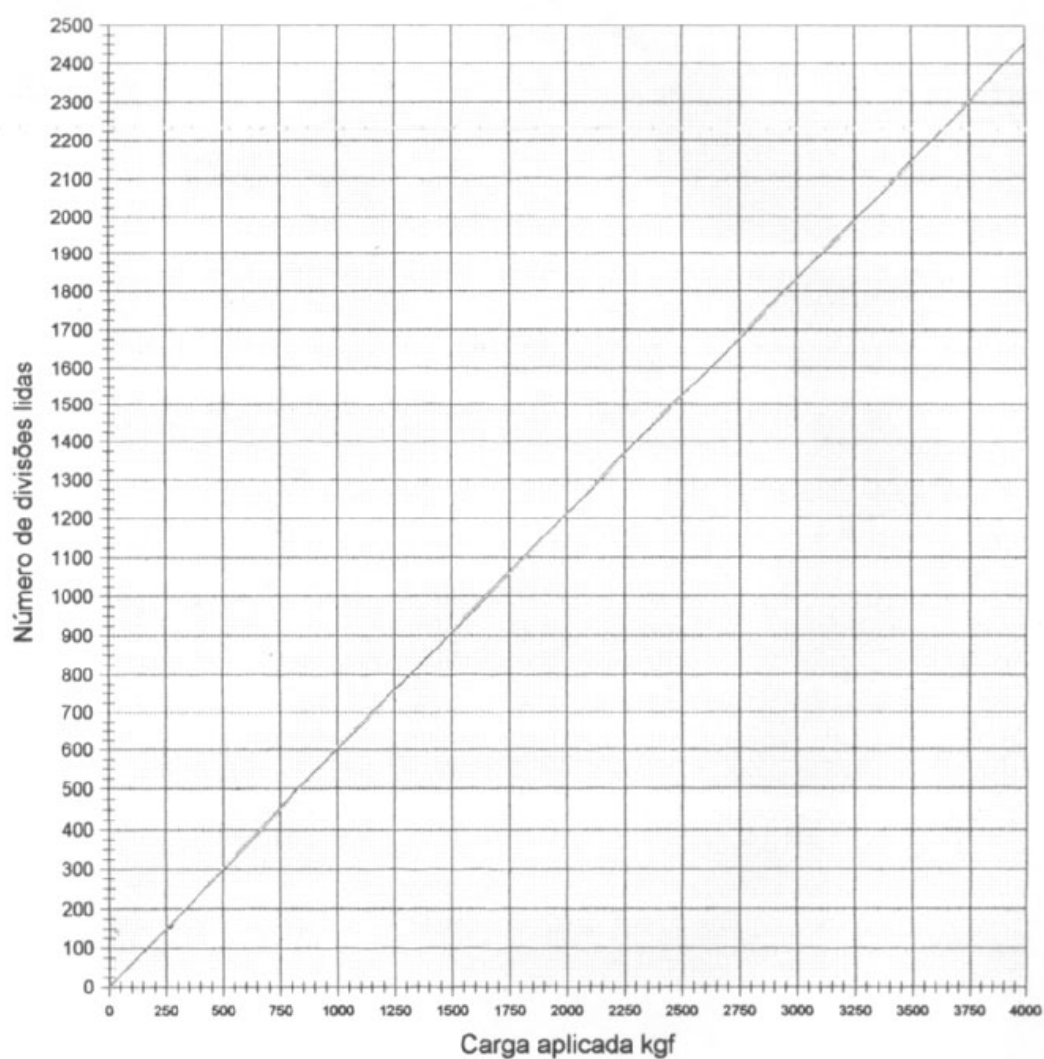


APARELHOS PARA MECÂNICA DO SOLO LTDA

Continuação do Certificado de Anel Dinamométrico

Nº 3 5 8 3 - 02

Página 02 de 02



Reta Média:			
$X = (y - a) / b$	ou	$X = \text{Carga Aplicada (kgf)}$	$a = -13,114$
$y = a + b \cdot x$		$Y = \text{Leitura (div)}$	$b = 0,616$

ANEXO C

GRÁFICOS DE PROBABILIDADE

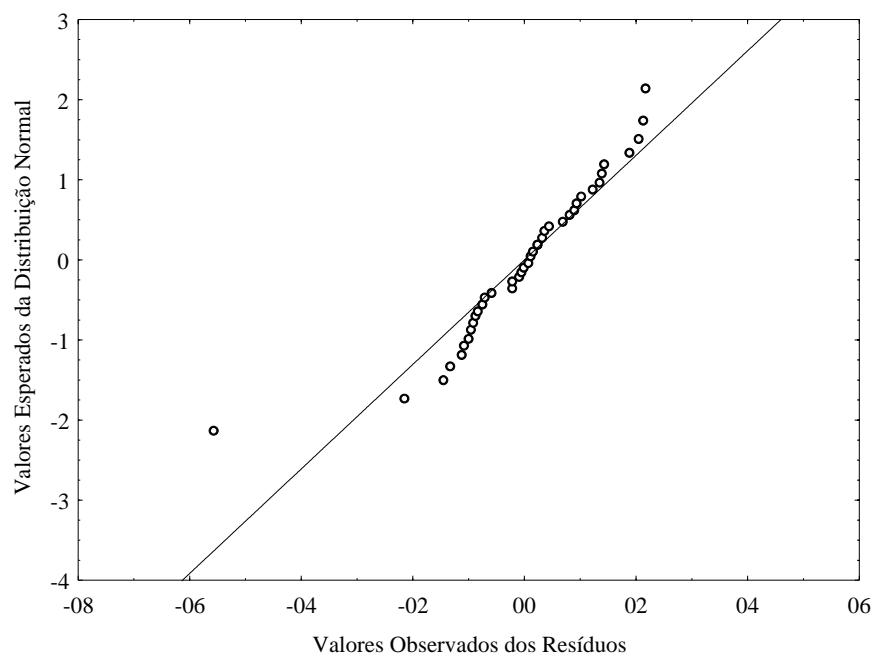


FIGURA C1 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável abatimento.

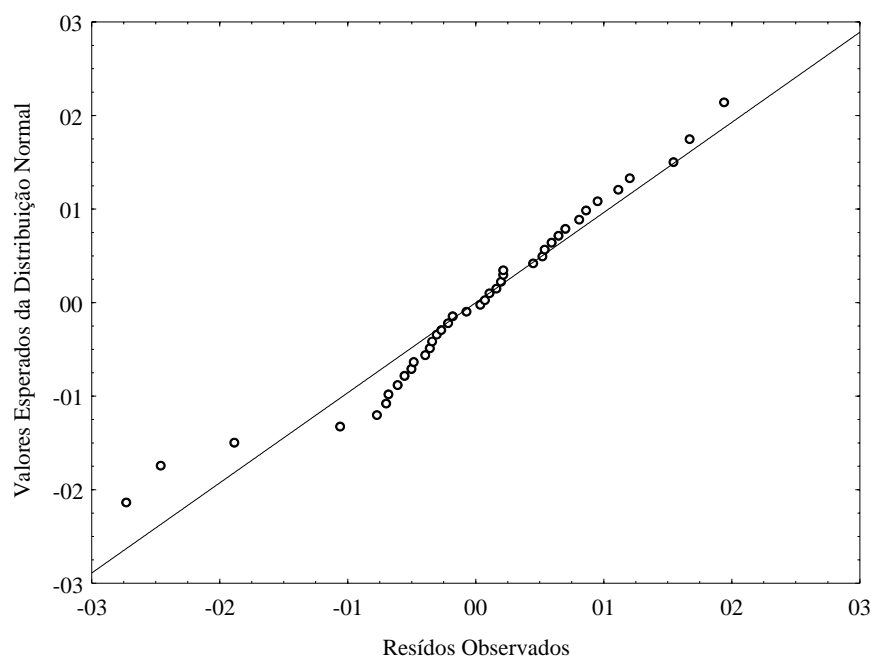


FIGURA C2 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável ar incorporado.

ANEXO C

GRÁFICOS DE PROBABILIDADE

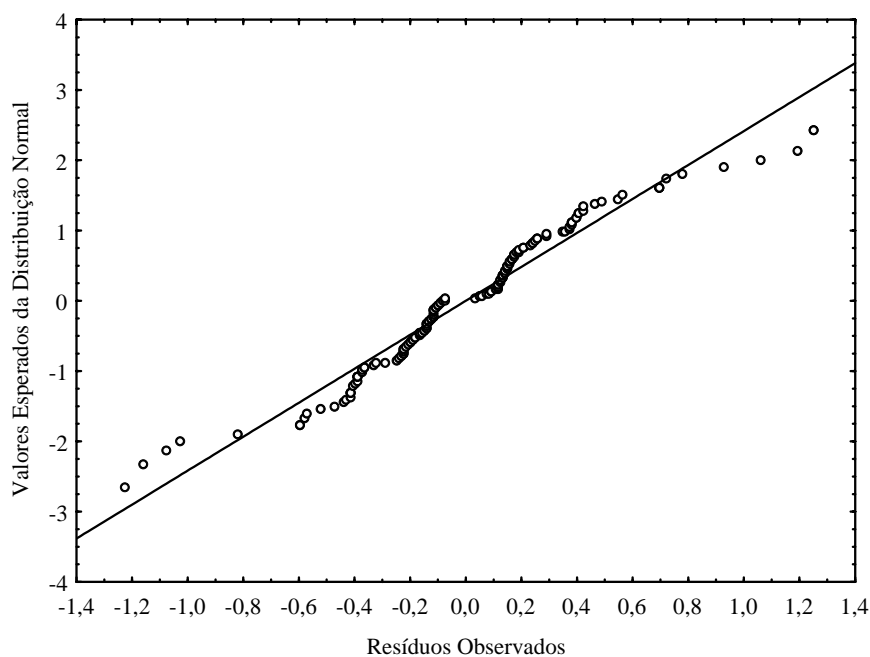


FIGURA C3 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável resistência à compressão.

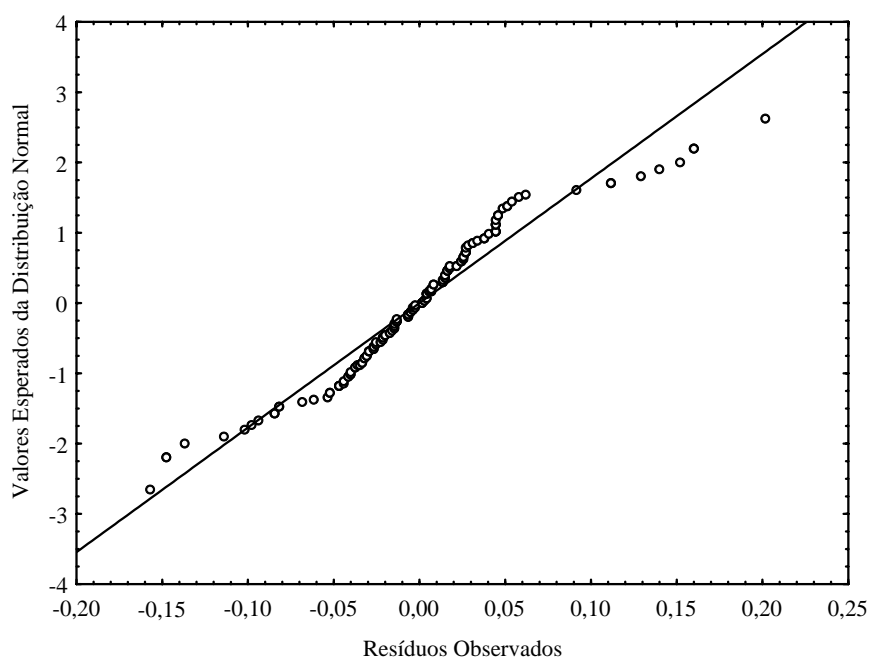


FIGURA C4 – Gráfico de probabilidade normal para os resíduos do modelo de análise de variância para a variável resistência à tração por compressão diametral.